

DE10206061

**Title:**  
**POLARISATION-OPTIMISED ILLUMINATION SYSTEM**

**Abstract:**

An illumination system for a projector unit for microlithography working with ultra-violet light, has an angle-retaining light mixer with at least one integrator rod comprising an inlet surface for receiving light from a light source and an output surface for output of emergent light mixed by means of the integrator rod. At least one prism arrangement for receiving emergent light and for changing the polarisation state of the emergent light is arranged in series after the integrator rod. A preferred prism arrangement has a polarisation distribution surface arranged perpendicular to the propagation direction of the emergent light which permits the unhindered transmission of light components with p polarisation and reflects components with s polarisation. The separated beams with orthogonal polarisation are brought parallel by means of a mirror surface arranged parallel to the polarisation distribution surface and the same polarisation state for both partial beams is achieved by means of a suitable retarder.



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

12 Offenlegungsschrift  
10 DE 102 06 061 A 1

51 Int. Cl. 7:  
G 03 F 7/20  
G 02 B 27/28  
G 02 B 27/10

21 Aktenzeichen: 102 06 061.4  
22 Anmeldetag: 8. 2. 2002  
43 Offenlegungstag: 4. 9. 2003

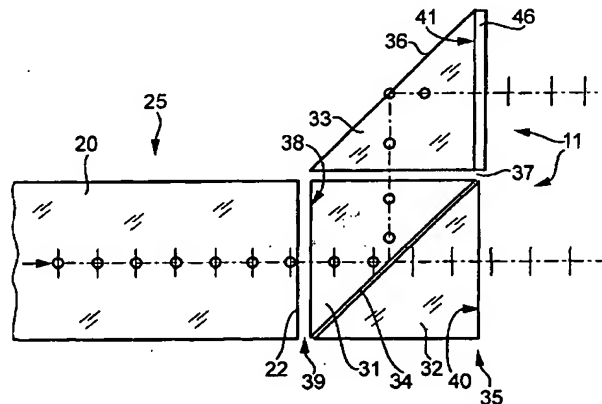
DE 102 06 061 A 1

71 Anmelder:  
Carl Zeiss Semiconductor Manufacturing System  
AG, 73447 Oberkochen, DE  
74 Vertreter:  
Patentanwälte Ruff, Wilhelm, Beier, Dauster &  
Partner, 70174 Stuttgart

72 Erfinder:  
Schuster, Karl-Heinz, 89551 Königsbrunn, DE  
56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
zu ziehende Druckschriften:  
DE 199 21 795 A1  
DE 195 35 392 A1  
US200 0/60 28 660 A  
US 56 77 755 A  
US 56 73 103 A  
US200 1/62 57 726 B1  
EP 05 88 937 B1  
JP 2 001/3 43 61 A  
JP 2 001/3 11 91 A  
JP 2 001/0 42 43 A

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

- 54 Polarisationsoptimiertes Beleuchtungssystem  
57 Ein Beleuchtungssystem für eine mit Ultraviolettlicht  
arbeitende Projektionsbelichtungsanlage für die Mikroli-  
thographie hat eine winkelerhaltende Lichtmischeinrich-  
tung mit mindestens einem Integratorstab, der eine Ein-  
trittsfläche zum Empfang von Licht einer Lichtquelle und  
einer Austrittsfläche zur Abgabe von durch den Integra-  
torstab gemischtem Austrittslicht aufweist. Dem Integra-  
torstab ist mindestens eine Prismenanordnung zum Emp-  
fang von Austrittslicht und zur Veränderung des Polaris-  
ationszustandes des Austrittslichts nachgeschaltet. Eine  
bevorzugte Prismenanordnung hat eine quer zur Ausbrei-  
tungsrichtung des Austrittslichts ausgerichtete Polaris-  
ationsteilerfläche, welche Lichtanteile mit p-Polarisa-  
tion ungehindert durchlässt und Anteile mit s-Polarisa-  
tion reflektiert. Die separierten Strahlen mit orthogonaler Polari-  
sation werden mittels einer parallel zur Polarisationsstei-  
lerfläche ausgerichteten Spiegelfläche parallelisiert und mit  
Hilfe geeigneter Retarder wird für beide Teilstrahlen der  
gleiche Polarisationszustand eingestellt.



DE 102 06 061 A 1

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf ein Beleuchtungssystem für eine optische Einrichtung, insbesondere für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie, sowie auf eine mit einem derartigen Beleuchtungssystem ausgestattete Projektionsbelichtungsanlage.

[0002] Die Leistungsfähigkeit von Projektionsbelichtungsanlagen für die mikrolithographische Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen fein strukturierten Bauteilen wird wesentlich durch die Abbildungseigenschaften der Projektionsoptik bestimmt. Darüber hinaus wird die Bildqualität und der mit einer Anlage erzielbare Wafer-Durchsatz wesentlich durch Eigenschaften des dem Projektionsobjektiv vorgeschalteten Beleuchtungssystems mitbestimmt. Dieses muss in der Lage sein, das Licht einer Lichtquelle mit möglichst hohem Wirkungsgrad zu präparieren und dabei eine Lichtverteilung einzustellen, die bezüglich Lage und Form beleuchteter Bereiche genau definierbar ist und bei der innerhalb beleuchteter Bereiche eine möglichst gleichmäßige Intensitätsverteilung vorliegt. Diese Forderungen sollen bei allen einstellbaren Beleuchtungsmodi gleichermaßen erfüllt sein, beispielsweise bei konventionellen Settings mit verschiedenen Kohärenzgraden oder bei Ringfeld-, Dipol- oder Quadrupolbeleuchtung, welche die Voraussetzungen für eine Abbildung der Retikelmuster mit hohem Interferenzkontrast sind.

[0003] Eine zunehmend wichtig werdende Forderung an Beleuchtungssysteme besteht darin, dass diese in der Lage sein sollten, Ausgangslicht mit einem möglichst genau definierbaren Polarisationszustand bereitzustellen. Beispielsweise kann es gewünscht sein, dass das auf die Photomaske oder in das nachfolgende Projektionsobjektiv fallende Licht weitgehend oder vollständig linear polarisiert ist und eine definierte Ausrichtung der Polarisationsvorzugsrichtung hat. Mit linear polarisiertem Eingangslicht können z. B. moderne katadioptrische Projektionsobjektive mit Polarisationsstrahlteiler (beam splitter cube, BSC) mit einem theoretischen Wirkungsgrad von 100% am Strahlteiler arbeiten. Es kann auch gewünscht sein, Beleuchtungslicht bereitzustellen, das im Bereich der Photomaske weitgehend unpolarisiert oder sehr gut zirkular polarisiert ist. Hierdurch können beispielsweise strukturellrichtungsabhängige Auflösungsunterschiede (H-V-Differenzen, CD-Variationen) vermieden werden, die auftreten können, wenn mit linear polarisiertem Licht beleuchtet wird und die typischen Strukturbreiten der abzubildenden Muster in der Größenordnung der verwendeten Wellenlänge liegen.

[0004] Eine weitere Forderung besteht insbesondere bei modernen mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlagen darin, dass eine im Bereich einer Pupillenebene des Beleuchtungssystems bereitgestellte Lichtverteilung unter weitgehender Erhaltung der Verteilung der Lichtenergie im Winkelraum, d. h. winkelerhaltend, in eine zur Pupillenebene des Beleuchtungssystems konjugierte Pupillenebene des Projektionsobjektivs übertragen werden sollte. Jede im Lichtweg zwischen den konjugierten Pupillenebenen eingeführte Veränderung des Winkelspektrums führt zu einer Verzerrung der in der Objektivpupille vorliegenden Intensitätsverteilung, was beispielsweise bei Dipol- oder Quadrupolbeleuchtung zu einer unsymmetrischen Einstrahlung bei der bildgebenden Zweistrahlinterferenz und damit zu einer Verschlechterung der Abbildungsleistung führen kann.

[0005] Ein hoher Grad von Gleichmäßigkeit bzw. Homogenität der auf die Photomaske (Retikel) fallenden Beleuchtung kann durch Mischung des von einer Lichtquelle kommenden Lichtes mit Hilfe einer Lichtmischeinrichtung erreicht werden. Bei Lichtmischeinrichtungen unterscheidet

man im wesentlichen zwischen Lichtmischeinrichtungen mit Wabenkondensoren und Lichtmischeinrichtungen mit Integratorstäben bzw. Lichtmischstäben. Diese Systeme haben spezifische Vor- und Nachteile. Wabenkondensoren mit Rasteranordnungen von Linsen (Fliegenaugenlinse) zur Erzeugung einer Vielzahl sekundärer Lichtquellen haben den Vorteil, dass der Polarisationszustand des durchtretenden Lichtes praktisch nicht verändert wird. Dem steht als Nachteil ein im Vergleich zu Integratorstäben schlechterer Wirkungsgrad der Lichttransmission gegenüber, da die Durchlassfläche im Bereich von Grenzflächen zwischen den einzelnen Linsen nicht-transmittierende Totbereiche aufweist. Ein Wabenkondensor verändert außerdem das Winkelspektrum des durchtretenden Lichtes aufgrund von durch Linsen eingeführte Aberrationen.

[0006] Beleuchtungssysteme, die Lichtmischeinrichtungen mit Wabenkondensoren aufweisen, sind beispielsweise in den US-Patenten US 6,211,944 B1 und US 6,252,647 B1 offenbart. Ein für den Bereich sichtbaren Lichtes konzipiertes Beleuchtungssystem für einen Projektionsapparat zur Projektion des Inhalts von LCD-Anzeigen ist im US-Patent US 6,257,726 B1 gezeigt.

[0007] Systeme mit Integratorstäben zeichnen sich demgegenüber durch einen überlegenen Transmissionswirkungsgrad aus. Bei den hier bevorzugt betrachteten, für Ultraviolettlicht ausgelegten Beleuchtungssystemen besteht ein Integratorstab aus einem für das Licht der Lichtquelle transparenten Material und wird im wesentlichen entlang seiner Längsrichtung mit Licht einer gegebenen Apertur durchstrahlt. In dem Integratorstab wird das durchtretende Licht wie in einem Kaleidoskop vielfach an den lateralen Grenzflächen total reflektiert, wodurch eine annähernd perfekte Mischung von nicht homogenen Anteilen des Lichtes erzielbar ist. Die Wirksamkeit der Mischung hängt dabei von der Anzahl der Reflexionen in den einzelnen Richtungen über die Stablänge ab. Bei den hier betrachteten Integratorstäben mit zueinander parallelen, ebenen lateralen Grenzflächen bleibt die Winkelverteilung des eintretenden Lichtes praktisch vollständig erhalten. Nachteilig bei Integratorstäben ist deren nur schlecht kontrollierbarer Einfluss auf den Polarisationszustand des durchtretenden Lichtes. Zum einen ist ein optischer Weg großer Länge im Einsatz. Auf diesem kann es aufgrund von intrinsischer oder induzierter Doppelbrechung zu unterschiedlich starken Verzögerungseffekten der in unterschiedliche Richtungen schwingenden Komponenten des elektrischen Feldvektors kommen. Zum anderen gibt es an den Seiten viele windschiefe (Total-)Reflexionen, die durch ihre phasenschiebende Wirkung den Polarisationszustand des durchtretenden Lichtes unkontrollierbar verändern.

[0008] Beleuchtungssysteme für den UV-Bereich mit stabförmigen Lichtintegratoren sind beispielsweise in den Deutschen Patentanmeldungen DE 44 21 053, DE 195 20 363, DE 199 12 464 oder im US-Patent US 6,028,660 offenbart. Stabintegratoren können auch als kaleidoskopartige Hohlleiter mit nach innen gerichteten Spiegelflächen ausgebildet sein.

[0009] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein insbesondere für die Verwendung in einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage geeignetes Beleuchtungssystem zu schaffen, welches das Licht einer zugeordneten Lichtquelle mit hohem Wirkungsgrad überträgt, einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Winkelverteilung des durchtretenden Lichtes hat und eine definierte Einstellung des Polarisationszustandes des austretenden Lichtes erlaubt.

[0010] Diese Aufgabe wird gelöst durch ein Beleuchtungssystem mit den Merkmalen von Anspruch 1. Vorteilhaftige Weiterbildungen sind in den abhängigen Ansprüchen

angeben. Der Wortlaut sämtlicher Ansprüche wird durch Bezugnahme zum Inhalt der Beschreibung gemacht.

[0011] Die Erfindung stellt ein Beleuchtungssystem für eine optische Einrichtung, insbesondere für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie bereit, welche eine Lichtmischeinrichtung aufweist. Die Lichtmischeinrichtung hat:

mindestens einen Integratorstab, der eine Eintrittsfläche zum Empfang von Licht einer Lichtquelle und einer Austrittsfläche zur Abgabe von durch den Integratorstab gemischtem Austrittslicht aufweist, sowie mindestens eine Prismenanordnung zum Empfang von Austrittslicht und zur Veränderung des Polarisationszustandes des Austrittslichtes, wobei die Prismenanordnung mindestens eine quer zur Ausbreitungsrichtung des Austrittslichtes ausgerichtete Polarisationssteilerfläche aufweist.

[0012] Die Prismenanordnung hat zwei oder mehr Prismen und bewirkt eine Veränderung des Polarisationszustandes des eintretenden Lichtes bei vollständiger Erhaltung der Lichtenergieverteilung im Winkelraum. Als Prisma wird hier ein Körper aus durchsichtigem, d. h. für das verwendete Licht transparenten Material bezeichnet, zu dessen Grenzflächen mindestens zwei sich schneidende Ebenen gehören. Die Prismen haben vorzugsweise nur ebene Grenzflächen, an denen das im Prisma verlaufende Licht, gegebenenfalls mehrfach, total reflektiert wird, bevor es aus dem Prisma austritt. Da keine Brechung an gekrümmten Flächen stattfindet, bleiben alle Strahlwinkel erhalten. Die Polarisationssteilerfläche lässt den Anteil des Lichtes, bei dem der elektrische Feldvektor parallel zur Einfallsebene schwingt (p-polarisiertes Licht), ungehindert durch, während der Lichtanteil, bei dem der elektrische Feldvektor senkrecht zur Einfallsebene schwingt (s-polarisiertes Licht), an der Polarisationssteilerfläche reflektiert und dadurch umgelenkt wird. Als Einfallsebene wird hier diejenige Ebene bezeichnet, die von der Einfallrichtung des Lichts und der Flächennormalen der Polarisationssteilerfläche aufgespannt wird. Das durchgelassene Licht hat somit unabhängig vom Polarisationszustand des einfallenden Lichtes am Austritt p-Polarisation und somit einen definierten Polarisationszustand.

[0013] Die Anordnung hat ohne weiteren Maßnahmen einen hohen Transmissions-Wirkungsgrad, wenn das auf die Polarisationssteilerfläche auftreffende Licht nahezu oder vollständig p-polarisiert ist.

[0014] Um unabhängig vom Polarisationszustand des auf die Polarisationssteilerfläche auftreffenden Lichtes die Gesamttransmission der Lichtmischeinrichtung zu optimieren, ist bei einer bevorzugten Weiterbildung vorgesehen, dass die Prismenanordnung mindestens eine Spiegelfläche aufweist, die in Bezug auf die Polarisationssteilerfläche derart angeordnet ist, dass von der Polarisationssteilerfläche reflektiertes (s-polarisiertes) Licht mit Hilfe der Spiegelfläche in eine Ausbreitungsrichtung umlenkbar ist, die im wesentlichen parallel zur Ausbreitungsrichtung des von der Polarisationssteilerfläche durchgelassenen Lichtes verläuft. Da hier mit hohem Reflexionsgrad reflektierbares, s-polarisiertes Licht auf die Spiegelfläche auftrifft, ist eine Umlenkung mit hohem Wirkungsgrad möglich. Es ist auch möglich, eine Spiegelfläche vorzusehen, die in Bezug auf die Polarisationssteilerfläche derart angeordnet ist, dass das ungehindert durch die Polarisationssteilerfläche hindurchtretende Licht in eine Richtung umgelenkt wird, die im wesentlichen parallel zur Ausbreitungsrichtung des von der Polarisationssteilerfläche reflektierten Lichtes verläuft.

[0015] In beiden Fällen steht hinter der Prismenanordnung ein sehr hoher Anteil der eintrittsseitig eingestrahnten Lichtenergie zur Verfügung, wobei der Polarisationszustand der beiden zumindest weitgehend parallelen Strahlen jeweils

definiert ist und dementsprechend gezielt verändert werden kann. Die Spiegelfläche ist vorzugsweise totalreflektierend und kann durch eine Grenzfläche eines Prismas der Prismenanordnung gebildet sein. Auch normal reflektierende Spiegelflächen sind möglich.

[0016] Bevorzugte Ausführungsformen haben an der Polarisationssteilerfläche eine optisch wirksame Polarisationssteilerschicht. Eine Polarisationssteilerschicht ist ein optisch wirksames Mehrschichtsystem mit Schichten aus dielektrischem, für die verwendete Lichtwellenlänge transparentem Material, wobei die übereinanderliegenden Schichten abwechselnd aus hochbrechendem und niedrigbrechendem Material bestehen. Das Mehrschichtsystem ist in Bezug auf das einfallende Licht im wesentlichen derart schräg ausgerichtet, dass an den Grenzflächen der Schichten Winkel nahe dem durch die Brechungsindizes der Materialien bestimmten, schichtspezifischen Brewsterwinkel auftreten. Für diesen ist bekanntlich der Reflexionsgrad für p-polarisiertes Licht minimal und der entsprechende Transmissionsgrad maximal.

[0017] Insbesondere für Anwendungen im Bereich des sichtbaren Lichtes kann gegebenenfalls auf eine Polarisationssteilerschicht verzichtet werden. Die Prismenanordnung kann dann unter Nutzung von Doppelbrechungseigenschaften der z. B. kristallinen Prismenmaterialien arbeiten und beispielsweise ein Nicol-Prisma, ein Rochon-Prisma o. dgl. umfassen. Die polarisationsselektive Wirkung kann gegebenenfalls auch durch eine oder mehrere schräggestellte Platten erzielt werden.

[0018] Prismenanordnungen, insbesondere solche mit Polarisationssteilerschicht, haben bevorzugt mindestens einen Polarisationssteilerblock mit einem ersten und einem zweiten Prisma, die einander zugewandte Grenzflächen aufweisen, zwischen denen die Polarisationssteilerfläche, insbesondere die Polarisationssteilerschicht, angeordnet ist. Dadurch findet die Aufspaltung der Polarisation vollständig innerhalb von transparentem Material statt, was für die Winkelerhaltung vorteilhaft ist. Im übrigen sollte der Polarisationssteilerblock freie, d. h. für Totalreflexion geeignete Außenflächen haben, um winkelerhaltend und ohne Lichtverlust Licht weiterzuleiten. Damit findet der Lichtstab im Bereich der Prismenanordnung eine allseitige Fortsetzung. Die für den Lichtaustritt oder Lichteintritt vorgesehenen Grenzflächen der Prismen sind vorzugsweise mindestens zum Teil mit geeigneten Entspiegelungsschichten belegt.

[0019] Um für das gesamte aus der Lichtmischeinrichtung austretende Licht einen einheitlichen Polarisationszustand einzustellen, werden geeignete Verzögerungselemente oder andere Maßnahmen entsprechender Wirkung verwendet. Eine bevorzugte Prismenanordnung hat mindestens eine erste Austrittsfläche zum Austritt von durch die Polarisationssteilerfläche transmittiertem Licht und mindestens eine zweite Austrittsfläche zum Austritt von durch die Polarisationssteilerfläche reflektiertem Licht. Mindestens einer der Austrittsflächen wird eine Einrichtung zur Veränderung des Polarisationszustandes des durchtretenden Lichtes nachgeschaltet, insbesondere mindestens ein optisches Verzögerungselement. Beispielsweise ist es möglich, einer der Austrittsflächen eine  $\lambda/2$ -Platte oder ein anderes Element nachzuschalten, welches eine Drehung der Polarisationsvorzugsrichtung um  $90^\circ$  bewirkt. Dadurch wird das gesamte Austrittslicht einheitlich p- oder s-polarisiert. Es ist auch möglich, beiden Austrittsflächen jeweils eine  $\lambda/4$ -Platte oder eine andere Einrichtung nachzuschalten, die aus eintretendem linear polarisiertem Licht zirkular polarisiertes Licht erzeugt. Dadurch wird das gesamte Austrittslicht zirkular polarisiert, mit gleichläufigem Drehsinn hinter den verschiedenen Austrittsflächen. Weitere Einrichtungen zur Verände-

nung des Polarisationszustandes können folgen.

[0020] Bei bevorzugten Prismenanordnungen tritt das Licht an zwei nebeneinander liegenden Austrittsflächen aus. Dabei kann zwischen den Austrittsflächen eine feine Trennlinie verminderter Austrittsintensität vorliegen. Um mögliche Auswirkungen auf die Abbildungsqualität zu vermeiden, ist bei bevorzugten Weiterbildungen für Wafer-Scanner die Polarisationssteilerfläche derart ausgerichtet, dass eine Schnittlinie zwischen dieser und einer senkrecht zur Austrittsrichtung des Lichtes ausgerichteten Ebene quer, insbesondere senkrecht zur Scanrichtung liegt. Damit wird auch bei Vorhandensein einer Trennlinie eine gleichmäßige Beleuchtung möglich.

[0021] Bei den hier betrachteten Beleuchtungssystemen wird Licht mit einer definierten Apertur in den Integratorstab eingestrahlt, der winkelerhaltend ist, so dass das Licht mit dieser Apertur auf die schräg zur Ausbreitungsrichtung liegende Polarisationssteilerfläche auftrifft. Für ein geöffnetes Lichtbündel wird in der Regel der Polarisationsgrad über der Apertur in Bezug auf achsparallele Strahlen asymmetrisch variieren. Um diesen Effekt zu kompensieren, hat die Prismenanordnung einer bevorzugten Weiterbildung eine erste Prismengruppe mit einer ersten Polarisationssteilerfläche und eine zweite Prismengruppe mit einer zweiten Polarisationssteilerfläche, wobei die Polarisationssteilerflächen spiegelsymmetrisch zu einer Spiegelebene des Integratorstabes angeordnet sind, die sich in Längsrichtung des Stabes erstreckt und eine Schnittlinie zwischen den Polarisationssteilerschichten enthält.

[0022] Lichtmischeinrichtungen sind vorzugsweise so gestaltet, dass die Querschnittsform der Austrittsfläche an die Form der zu beleuchtenden Fläche angepasst ist. Daher ist der Stabquerschnitt üblicher Stabintegratoren rechteckig mit einem von eins abweichenden Aspektverhältnis. Während bei herkömmlichen, zylindrischen Stabintegratoren die Austrittsfläche in Form und Größe der Eintrittsfläche entspricht, werden durch die Erfindung winkelerhaltende Lichtmischeinrichtungen geschaffen, bei denen die vom Ausgang der Prismenanordnung gebildete Austrittsfläche eine vom Eintrittsflächenquerschnitt abweichenden Austrittsflächenquerschnitt hat. Insbesondere kann die Austrittsfläche größer sein als die Eintrittsfläche. Der Austrittsflächenquerschnitt kann beispielsweise ein ganzzahliges Vielfaches, insbesondere etwa das Doppelte des Eintrittsflächenquerschnittes betragen. Da der Integratorstab somit einen kleineren Querschnitt haben kann als die gewünschte Austrittsfläche, ist durch Verkleinerung des Stabquerschnitts eine Materialersparnis möglich. Außerdem wird die Anzahl der Reflexionen in einer Richtung vergrößert, wodurch die Homogenität des Austrittslichts in dieser Richtung verbessert wird.

[0023] Um bei moderaten Anforderungen an die Winkelbelastbarkeit der Polarisationssteilerschicht gut durchmischende Lichtmischeinrichtungen hoher Transmission zu erhalten, können verschiedene einzeln oder in Kombination vorteilhafte Maßnahmen ergriffen werden.

[0024] Bei einer bevorzugten Weiterbildung ist vorgesehen, dass mindestens ein Integratorstab der Lichtmischeinrichtung aus einem UV-transparenten Material besteht, dessen Absorptionskante bei niedrigeren Wellenlängen liegt als die Absorptionskante von Kalziumfluorid. Als Stabmaterial kommen hier beispielsweise Magnesiumfluorid oder Lithiumfluorid in Betracht. Eine Verwendung von doppelbrechendem Material wie Magnesiumfluorid ist bei Ausführungsformen mit nachgeschalteter Einrichtung zur Änderung des Polarisationszustandes unproblematisch, da die durch Doppelbrechung verursachte Veränderung des Polarisationszustandes hinter dem Integratorstab bereinigt wird. Die Verwendung UV-geeigneter Materialien mit geringst-

möglicher Volumenabsorption erlaubt Stababordnungen mit hohen Nutzlängen, welche auch bei niedriger innerer Apertur ausreichend viele Reflexionen erzeugen.

[0025] Alternativ oder zusätzlich kann eine gegebenenfalls mehrfache Faltung einer Integratorstababordnung vorgesehen sein, um auf beschränktem Bauraum große Gesamtlängen der Stababordnung unterbringen zu können. Dies kann dadurch erreicht werden, dass mehrere Integratorstäbe vorgesehen sind und dass zwischen einem ersten Integratorstab und einem nachfolgendem zweiten Integratorstab mindestens eine winkelerhaltende Umlenkeinrichtung zur Umlenkung der Lichtlaufrichtung vorgesehen ist. Bevorzugt sind Umlenkungen um 90 oder 180°. Eine nahezu verlustfreie, winkelerhaltende Umlenkung kann durch ein oder mehrere zwischengeschaltete Umlenkprismen ermöglicht werden. Diese Umlenkprismen haben vorzugsweise an ihren dem Lichteintritt oder -austritt dienenden Flächen Entspiegelungsschichten, wobei die Totalreflexion erhalten bleibt. Die Umlenkprismen sind vorzugsweise aus einem hochbrechenden Material, für dessen Brechungsindex vorzugsweise  $n > 1,6$  gilt, z. B. aus BaF<sub>2</sub>. Dadurch kann Totalreflexion auch bei großen numerischen Aperturen genutzt werden.

[0026] Eine Maßnahme zur Erhöhung der Anzahl von Reflexionen in einem Stab gegebener Länge besteht darin, den Integratorstab in einen ungeteilten Stababschnitt unmittelbar vor der Austrittsfläche und mindestens einen dem ungeteilten Stababschnitt vorgeschalteten, geteilten Stababschnitt aufzuteilen, der mindestens zwei den Gesamtquerschnitt des Integratorstabes im wesentlichen ausfüllende, total reflektierende Stäbchen aufweist. Durch die kleineren Stabquerschnitte im Bereich der Stäbchen werden hier höhere Reflexionszahlen und damit eine bessere Durchmischung erreicht, wobei der nachfolgende ungeteilte Abschnitt eine weitere Homogenisierung bewirkt. Eine abgestufte Teilung über die Länge des Stabes ist ebenfalls möglich, wobei beispielsweise zwei oder mehr geteilte Bereiche mit unterschiedlichen Anzahlen von Stäbchen vorgesehen sein können.

[0027] Zusätzliche Freiheitsgrade bei der Optimierung der Lichtmischeinrichtung hinsichtlich Material und polarisationsoptischer Wirkung werden bei bevorzugten Weiterbildungen dadurch erreicht, dass der Integratorstab aus einem ersten Material und mindestens ein Prisma der Prismenanordnung und/oder mindestens ein Umlenkprisma aus einem zweiten Material besteht, welches sich vom ersten Material unterscheidet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die vor und/oder hinter einem Integratorstab angeordneten Prismen im Vergleich zum Integratorstab relativ klein sind, so dass eine gegebenenfalls vorhandene intrinsische Doppelbrechung von geringerer Bedeutung ist. Beispielsweise können bei einem System für 157 nm Wellenlänge die Prismen aus Kalziumfluorid, dem nur in kleinen Volumina kostengünstig verfügbaren Bariumfluorid, synthetischem Quarzglas oder einem anderen geeigneten, optisch isotropen Material bestehen. Das Stabmaterial sollte im Hinblick auf niedrige Absorption ausgewählt werden; beispielsweise kann Kalziumfluorid, Magnesiumfluorid oder Lithiumfluorid verwendet werden.

[0028] Eine gezielte Materialauswahl kann auch dazu genutzt werden, die polarisationsteilende Wirkung eines Polarisationssteilerblockes mit Polarisationssteiler-Schichtsystem zu optimieren. Hierzu ist das Material des ersten und des zweiten Prismas in Abhängigkeit von den Brechzahlverhältnissen in der Polarisationssteilerschicht so auszuwählen, dass ein Fehlwinkel zwischen der Einfallrichtung des auf die Polarisationssteilerschicht auffallenden Lichts und einer dem Brewsterwinkel des Schichtsystems entsprechenden Rich-

tung optimiert wird, insbesondere minimiert wird. Dadurch kann ein maximaler Transmissionsgrad für ppolarisiertes Licht erzielt werden. Als Prismenmaterial sind Materialien mit hohem Brechungsindex, insbesondere  $n > 1,6$  bevorzugt, z. B. BaF<sub>2</sub>. Dadurch kann Totalreflexion auch bei hoher NA genutzt werden.

[0029] Gemäß einer Weiterbildung ist vorgesehen, dass mindestens ein Teil, vorzugsweise alle totalreflektierenden und nicht-totalreflektierenden Flächen mit reflektierender Wirkung mit einer dünnen Beschichtung mit phasenerhaltender Wirkung belegt sind. Je nach Flächentyp sind zwei Typen phasenerhaltender Schichtsysteme besonders vorteilhaft. Auf den Seitenflächen, die nicht als Lichteintritts- oder Lichtaustrittsflächen dienen, sind die Schichten bevorzugt für eine Phasenerhaltung in Reflexion und/oder Totalreflexion optimiert. Bei denjenigen Flächen, die als Lichteintritts- oder Lichtaustrittsflächen dienen, haben die Schichten bevorzugt eine Doppelfunktion. Sie wirken in Reflexion, insbesondere bei Totalreflexion phasenkorrigierend bzw. phasenerhaltend und in Transmission als Entspiegelungsschichten. Schichten dieser Art können insbesondere auf allen Kathetenflächen der Prismen der Prismenanordnung vorgesehen sein.

[0030] Bei einer Weiterbildung ist der Lichtmischeinrichtung mindestens eine Blende zur Einstellung der örtlichen Verteilung der Energie eines durch die Lichtmischeinrichtung erzeugten Beleuchtungsfeldes zugeordnet, wobei die Blende vorzugsweise bewegliche Blendenelemente zur gesteuerten Veränderung der Breite eines Beleuchtungsfeldes als Funktion von Positionen entlang der Länge des Beleuchtungsfeldes aufweist. Dadurch kann beispielsweise an einer Längsposition, in der eine erhöhte Lichtintensität herrscht, die Breite des Beleuchtungsfeldes soweit reduziert werden, dass durch die integrierende Wirkung einer Scan-Bewegung über die gesamte Länge des Beleuchtungsfeldes im wesentlichen die gleiche Beleuchtungsdosis erzielt wird. Ein Beispiel einer solchen Blende ist im Patent US 6,097,474 offenbart, dessen Offenbarungsgehalt insoweit durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Beschreibung gemacht wird.

[0031] Das Beleuchtungssystem kann so aufgebaut sein, dass das aus der Lichtmischeinrichtung austretende Licht ohne zwischengeschaltete Abbildung auf die zu beleuchtende Struktur, beispielsweise eine Photomaske fällt. Ein Vorteil hierbei ist die deutlich reduzierte NA im Strahlteiler des Projektionsobjektivs und damit in dessen Polarisationssteuerschicht. Bei bevorzugten Weiterbildungen ist ein Objektiv nachgeschaltet, das den Bereich des Lichtaustritts der Lichtmischeinrichtung auf das Retikel abbildet, welches in der Objektebene des nachfolgenden Projektionsobjektivs angeordnet ist. Dieses Objektiv hat mindestens eine Ebene, die eine Fouriertransformierte Ebene zur Retikelebene ist und dementsprechend an konjugierter Stelle zur Pupille des nachfolgenden Projektionsobjektivs liegt. Bei einer bevorzugten Ausführungsform ist im Bereich der Pupille dieses Objektivs ein Polarisationsfilter angeordnet, das als polarisationsselektiver Retroreflektor nach Art eines Katzenauges (in einem Schnitt) wirkt und mehrere paarweise V-förmig im Winkel zueinander angeordnete Polarisationssteuerschichten bzw. Polarisationssteuerschichten hat. In der genannten Einbauposition wirkt das Polarisationsfilter als Zwischenpolarisator, um den Polarisationszustand des eintreffenden Lichtes aufzufrischen bzw. so zu bereinigen, dass nur p-polarisiertes Licht durchgelassen und s-polarisiertes Licht reflektiert wird.

[0032] Filter dieses Typs sind auch unabhängig von sonstigen Merkmalen der Erfindung nützlich.

[0033] Die vorstehenden und weiteren Merkmale gehen außer aus den Ansprüchen auch aus der Beschreibung und

den Zeichnungen hervor, wobei die einzelnen Merkmale jeweils für sich alleine oder zu mehreren in Form von Unterkombinationen bei einer Ausführungsform der Erfindung und auf anderen Gebieten verwirklicht sein und vorteilhafte sowie für sich schutzfähige Ausführungen darstellen können.

[0034] Fig. 1 ist eine schematische Darstellung einer Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einer Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Beleuchtungseinrichtung;

[0035] Fig. 2 ist eine axiale Draufsicht auf die Lichtaustrittsseite einer Lichtmischeinrichtung der in Fig. 1 gezeigten Art;

[0036] Fig. 3 ist ein schematischer Schnitt durch den austrittsseitigen Endbereich einer Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Lichtmischeinrichtung mit einer bevorzugten Variante einer Prismenanordnung;

[0037] Fig. 4 ist ein schematischer Schnitt durch den austrittsseitigen Endbereich einer anderen Ausführungsform einer Lichtmischeinrichtung;

[0038] Fig. 5 ist ein schematischer Schnitt durch den austrittsseitigen Endbereich einer weiteren, anderen Ausführungsform einer Lichtmischeinrichtung;

[0039] Fig. 6 zeigt schematisch eine Ausführungsform einer Lichtmischeinrichtung mit vier Integratorstäben und mehrfacher Faltung der Integratorstabanordnung;

[0040] Fig. 7 zeigt eine andere Ausführungsform einer Lichtmischeinrichtung mit zwei parallel versetzten Integratorstäben und 180°-Stahumlenkung;

[0041] Fig. 8 ist eine perspektivische Ansicht eines Integratorstabes mit zwei geteilten und einem ungeteilten Stababschnitt;

[0042] Fig. 9 ist ein schematischer Schnitt durch den austrittsseitigen Endbereich einer Ausführungsform einer Lichtmischeinrichtung mit einer spiegelsymmetrisch aufgebauten Prismenanordnung;

[0043] Fig. 10 zeigt schematische Darstellungen des Polarisationsgrades für p-Polarisation als Funktion der Strahlentour bei nicht symmetrischem Ausgang (a) und bei symmetrischem Ausgang (b) der Lichtmischeinrichtung;

[0044] Fig. 11 zeigt eine schematische Darstellung einer bevorzugten Ausführungsform einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage; und

[0045] Fig. 12 zeigt eine Ausführungsform eines Polarisationsfilters, welcher eine Prismenanordnung mit mehreren Prismen aufweist, zwischen denen zick-zack-förmig angeordnete Polarisationsstrahlteilerschichten angeordnet sind.

[0046] In Fig. 1 ist ein Beispiel einer Projektionsbelichtungsanlage 1 für die mikrolithographische Herstellung von integrierten Schaltkreisen und anderen feinstrukturierten Bauelementen bei Auflösungen bis zu Bruchteilen von 1 µm vorgesehen. Die Anlage 1 umfasst ein Beleuchtungssystem 2 zur Beleuchtung einer in der Bildebene 4 des Beleuchtungssystems angeordneten Photomaske 5 sowie ein Projektionsobjektiv 6, welche das in seiner Objektebene 4 angeordnete Muster der Photomaske in die Bildebene 7 des Projektionsobjektivs in verkleinertem Maßstab abbildet. In der Bildebene 7 befindet sich beispielsweise ein mit einer lichtempfindlichen Schicht beschichteter Halbleiter-Wafer.

[0047] Als Lichtquelle des Beleuchtungssystems 2 dient ein Laser 8, beispielsweise ein im tiefem Ultraviolettbereich (DUV) gebräuchlicher Excimer-Laser mit einer Arbeitswellenlänge von 248 nm, 193 nm oder 157 nm. Das Licht des abgegebenen Lichtstrahls ist weitgehend linear polarisiert. Eine nachfolgende optische Einrichtung 9 formt das Licht der Lichtquelle und überträgt es in eine nachfolgende Lichtmischeinrichtung 10. Die optische Einrichtung 9 umfasst im gezeigten Beispiel einen dem Laser 8 nachgeschalteten

Strahlaufweiter, der zur Kohärenzreduktion und Strahlformung auf einen rechtwinkligen Strahlquerschnitt mit einem Aspektverhältnis  $x/y$  seiner Seitenlängen von mehr als eins dient. Ein dem Strahlaufweiter nachfolgendes, erstes diffraktives optisches Rasterelement sitzt in der Objektebene eines nachfolgenden Zoom-Objektives, in dessen Austrittspupille ein zweites optisches Rasterelement vorgesehen ist. Von diesem tritt das Licht in eine Einkoppeloptik ein, welche das Licht in die Lichtmischeinrichtung überträgt. Das Licht wird innerhalb der Lichtmischeinrichtung 10 durch mehrfache innere Reflexion gemischt und homogenisiert und tritt am Austritt 11 der Lichtmischeinrichtung weitgehend homogenisiert aus. Unmittelbar am Austritt der Lichtmischeinrichtung ist eine Zwischenfeldebene, in der ein Retikel-Masking-System (REMA) 12, eine verstellbare Feldblende, angeordnet ist. Das nachfolgende Objektiv 13, welches auch als REMA-Objektiv bezeichnet wird, hat mehrere Linsengruppen, eine Pupillenebene 14 und einen Umkehrspiegel 15 und bildet die Zwischenfeldebene des Retikel-Masking-Systems auf das Retikel bzw. die Photomaske 5 ab.

[0048] Weitere Details zu Aufbau und Funktionsweise eines derartigen Beleuchtungssystems sind der DE 195 20 563 entnehmbar, deren Inhalt insoweit durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Anmeldung gemacht wird. Ein wichtiger Unterschied zum Beleuchtungssystem der DE 195 20 563 besteht im Aufbau der Lichtmischeinrichtung 10, die noch im Detail beschrieben wird.

[0049] Bei einem Wafer-Stepper wird auf dem Retikel 5 die gesamte einem Chip entsprechende strukturierte Fläche, im allgemeinen ein Rechteck mit einem beliebigen Aspektverhältnis zwischen Höhe und Breite von z. B. 1 : 1 bis 1 : 2 so gleichmäßig und randscharf wie möglich beleuchtet. Bei einem Wafer-Scanner der dargestellten Art wird auf dem Retikel 5 ein schmaler Streifen, z. B. einem Rechteck mit einem Aspektverhältnis von typischerweise 1 : 2 bis 1 : 8 beleuchtet und durch Scannen in einer der y-Richtung des Beleuchtungssystems entsprechenden Richtung das gesamte strukturierte Feld eines Chips seriell beleuchtet. Auch hier ist die Beleuchtung extrem gleichmäßig und zumindest in Richtung senkrecht zur Scanrichtung, d. h. in x-Richtung, randscharf zu gestalten.

[0050] In Ausnahmefällen sind auch andere Formen der beleuchteten Fläche auf der Photomaske 5 möglich. Die Öffnung des Retikel-Masking-Systems 12 und die Querschnittsform des Lichtaustritts 11 der Lichtmischeinrichtung 10 sind der benötigten Feldform genau angepasst. Die in Fig. 2 gezeigte, axiale Draufsicht auf die Austrittsfläche 11 der Lichtmischeinrichtung 10 zeigt schematisch, dass die Breite in x-Richtung ein Mehrfaches der Gesamthöhe in y-Richtung (Scanrichtung) beträgt.

[0051] Die Lichtmischeinrichtung 10 umfasst einen Integratorstab 20 und eine unmittelbar mit geringem Luftabstand nachfolgende Prismenanordnung 30. Der Integratorstab ist ein im Querschnitt rechteckiger Stab aus einem für das Licht der Lichtquelle 8 transparenten Material, beispielsweise aus kristallinem Kalziumfluorid. Die Längsachse des Stabes verläuft parallel zur z-Richtung bzw. zur optischen Achse des Beleuchtungssystems. Der Stab 20 hat eine der optischen Einrichtung 9 zugewandte, ebene Eintrittsfläche 21 zum Empfang eines geformten Lichtstrahles der Lichtquelle 8, eine ebene Austrittsfläche 22, aus der Licht, welches innerhalb des Integratorstabes 20 gemischt wird, austritt, und ebene, paarweise parallel zueinander verlaufende Seitenflächen.

[0052] Die Prismenanordnung 30 hat eine Baugruppe mit drei Prismen 31, 32 und 33, die bei bevorzugten Ausführungsformen identisch geformt und dimensioniert sind. Es handelt sich vorzugsweise jeweils um Prismen mit zwei

senkrecht aufeinander stehenden Grenzflächen im wesentlichen gleicher Größe (Kathetenflächen) und einer größeren Hypotenusenfläche, die in einem Winkel von ca. 45° zu den Kathetenflächen ausgerichtet ist. Zwei der Prismen, nämlich das erste Prisma 31 und das zweite Prisma 32, schließen zwischen ihren Hypotenusenflächen eine ebene Polarisationssteilerschicht 34 ein und bilden einen kompakten, quaderförmigen Polarisationssteilerblock 35 mit etwa quadratischem Querschnitt in der y-z-Ebene und Kathetenflächen, deren Querschnitt dem Querschnitt der Stabaustrittsfläche 22 entspricht. Die Hypotense des dritten Prismas 33, welches hier auch als des dritten Prismas 33, welches hier auch als Spiegelprisma bezeichnet wird, ist parallel zur Polarisationssteilerfläche 34 ausgerichtet und bildet eine ebene, reflektierende, vorzugsweise totalreflektierende Spiegelfläche 36.

[0053] Die einander zugewandten Kathetenflächen von Polarisationssteilerblock 35 und drittem Prisma 33 haben einen geringen Abstand 37 zueinander, der in der Größenordnung von einigen Lichtwellenlängen des verwendeten Lichts liegen kann, um Totalreflexion an den angrenzenden Kathetenflächen zu ermöglichen. Auch die anderen freien Prismenflächen grenzen an Gas oder ein anderes optisch dünneres Medium, um Totalreflexion zu ermöglichen. Insbesondere besteht auch zwischen der Austrittsfläche 22 des Integratorstabes 20 und der Eintrittsfläche 38 des Strahlteilerblocks ein geringer Luftabstand 39. Die Prismen 31 bis 33 der Prismenanordnung können in einer gemeinsamen Fassung fixiert sein, die wiederum an einer Fassung für den Integratorstab 20 befestigt sein kann, um die Geometrie der Anordnung zu fixieren.

[0054] Die Lichtmischeinrichtungen der Fig. 1 und 3 sind bezüglich Integratorstab und Prismenanordnung identisch aufgebaut, weshalb für entsprechende Merkmale die gleichen Bezugszeichen verwendet werden.

[0055] Bei der Lichtmischeinrichtung 10 in Fig. 1 ist an der austrittsseitigen Kathetenfläche 40 des dritten Prismas 32 ein als  $\lambda/2$  Platte ausgeführtes Verzögerungselement 45 angesprengt, welches eine Rechteck-Platte aus doppelbrechendem Material ist, dessen axiale Dicke und Kristallachse so bemessen ist, dass sich zwischen den senkrecht zueinander schwingenden Komponenten des elektrischen Feldvektors eine Verzögerung einer halben Wellenlänge ergibt, was zu einer Drehung einer vorhandenen Polarisationsvorzugsrichtung um 90° um die Ausbreitungsrichtung des Lichtes führt.

[0056] Die hier gezeigte Projektionsbelichtungsanlage arbeitet mit weitgehend linear polarisiertem Eingangslicht des Lasers. Das Projektionsobjektiv 6 ist im Beispiel ein kadiopisches Projektionsobjektiv mit einem polarisationsselektiven, physikalischen Strahlteiler (ein Beispiel wird im Zusammenhang mit Fig. 11 noch erläutert). Derartige Projektionsobjektive arbeiten im Bereich des Strahlteilers mit höchstem Wirkungsgrad, wenn geeignet linear polarisiertes Licht eingestrahlt wird. Damit entsteht die Forderung, dass das Beleuchtungssystem zwischen Laser 8 und Lichtaustritt polarisationserhaltend sein sollte und/oder eine gezielte Einstellung des Polarisationszustandes des auftretenden Lichts ermöglichen sollte. Zusätzlich besteht die Forderung, eine winkelerhaltende Lichtmischung zu erzielen, um eine im Bereich einer Pupillenebene der optischen Einrichtung 9 erzeugte räumliche Intensitätsverteilung in der zu dieser Pupillenebene optisch konjugierten Pupillenebene 16 des Projektionsobjektives zu reproduzieren.

[0057] Die Lichtmischeinrichtung 10 erfüllt diese Forderung nach einer winkelerhaltenden Lichtmischung wegen der ausschließlich ebenen, reflektierenden, vorzugsweise totalreflektierenden Grenzflächen an Integratorstab und Pris-

menanordnung. Außerdem wird eine Einstellung eines definierten Polarisationszustandes am Austritt 11 der Lichtmischeinrichtung ermöglicht. Im Integratorstab 20 können aufgrund von permanenter oder induzierter oder intrinsischer Doppelbrechung des Stabmaterials sowie einer Vielzahl windschiefer Reflexionen an den Seitenflächen erhebliche Phasenverschiebungen zwischen den verschiedenen Feldkomponenten des Lichts auftreten. Dadurch findet normalerweise eine schwer kontrollierbare Veränderung des Polarisationsgrades des Eingangslichtes statt und am Stabaustritt 22 tritt teilpolarisiertes Licht aus. Dieses tritt aus der mit einer Entspiegelungsschicht versehenen Austrittsfläche 22 aus und über die entspiegelte Eintrittsfläche 38 in den Strahlteilerblock 35 ein, in welchem sich in einem Winkel von ca. 45° zur Einstrahlrichtung die Polarisationssteilerschicht 34 befindet. Diese lässt alles Licht, welches in der Einfallsebene schwingt (p-Polarisation, gekennzeichnet durch Striche senkrecht zur Ausbreitungsrichtung) ungehindert durch. Alles Licht, welches senkrecht zur Einfallsebene schwingt (s-Polarisation, gekennzeichnet durch Punkte entlang der Ausbreitungsrichtung) wird unter einem Einfallswinkel von ca. 45° zur Polarisationssteilerschicht reflektiert und verlässt den Polarisationssteilerblock im wesentlichen senkrecht zur Einstrahlrichtung über eine entspiegelte Kathetenfläche Richtung drittes Prisma 33. Das im wesentlichen senkrecht zur Stablängsachse austretende, reflektierte Licht wird an der Spiegelfläche 36 des dritten Prismas um ca. 90° so umgelenkt, dass seine Ausbreitungsrichtung hinter der Spiegelfläche 36 im wesentlichen parallel zur Ausbreitungsrichtung des von der Polarisationssteilerschicht 34 durchgelassenen Lichtes verläuft.

[0058] Bei der Ausführungsform gemäß Fig. 1 wird das durch die Schicht 34 transmittierte, p-polarisierte Licht durch die  $\lambda/2$ -Platte 45 verlustfrei in spolarisiertes Licht umgewandelt, so dass beide Austrittsstrahlen spolarisiert sind. Eine s-Polarisation am Eingang des REMA-Objektivs 13 ist bei solchen Ausführungsformen vorteilhaft, die, wie die Ausführungsform gemäß Fig. 1, innerhalb des Objektivs einen Umlenkspiegel 15 aufweisen, der für s-Polarisation einen höheren Reflexionsgrad aufweist als für p-Polarisation.

[0059] Bei der Ausführungsform einer Lichtmischeinrichtung 25 gemäß Fig. 3 wird dagegen die Polarisationsvorzugsrichtung der hinter der Spiegelfläche s-polarisierten Strahlung durch die Verzögerungsplatte 46 um 90° gedreht, welche an den Austritt 41 des Spiegelprismas 33 angesprengt ist. Beide, übereinander liegenden Ausgänge (vgl. Fig. 2) haben nun identische p-Polarisation.

[0060] In beiden Fällen ergeben sich gleich polarisierte parallele Austrittsstrahlen, die in ihrer Gesamtfläche den für die Lichtaustrittsseite 11 der Lichtmischeinrichtung gewünschten Querschnitt, beispielsweise 12 x 22 mm, haben. Dieser Querschnitt ist doppelt so groß wie der Querschnitt der Stabeintrittsfläche 21. Damit ist gleichzeitig eine winkelerhaltende Lichtmischeinrichtung mit einem bezüglich des Polarisationszustandes genau definierbaren Lichtaustritt geschaffen, bei dem der Querschnitt der Austrittsfläche 11 vom Querschnitt der Eintrittsfläche 21 abweicht. Neben dem gezeigten Faktor zwei sind auch andere Flächenverhältnisse möglich, insbesondere ganzzahlige Vielfache des Eintrittsflächenquerschnitts.

[0061] Mit Hilfe dieses Querschnitts kann nun in y-Richtung (Fig. 2) gescannt werden. Über ein gut polarisationserhaltendes REMA-Objektiv 13 kann auch Retikel-Masking betrieben werden. Durch das Scannen ist die feine Trennung, die sich aufgrund des Luftspaltes 37 zwischen den übereinander liegenden Feldern I und II ergibt, bedeutungslos für die Abbildung. Für die Funktion fällt weiter auf, dass

im oben liegenden, durch das dritte Prisma führenden Feld II eine längere Strecke mit Lichtmischung zurückgelegt wird. Auch dies ist für eine gleichmäßige Ausleuchtung bedeutungslos. Die Lichtmischwege bleiben jeder für sich optisch in ihrer Funktion vollständig erhalten, da alle freiliegenden Prismenflächen an den Kathetenflächen total reflektierend sind. Diese Kathetenflächen sind mit einer phasenerhaltenden Beschichtung belegt.

[0062] Die gezeigten Lichtmischeinrichtungen 10 und 25 sind nicht nur bei weitgehend linear polarisiertem Eingangslicht nützlich, sondern liefern unabhängig vom Polarisationsgrad des Eingangslichtes am Austritt 11 vollständig polarisiertes Licht mit s- oder p-Polarisation. Dies ist daraus ersichtlich, dass unabhängig von der Eingangspolarisation (z. B. unpolarisiert, zirkular polarisiert, linear polarisiert oder mit rotierender linearer Polarisation) an der Strahlteilerfläche 34 jeweils p-Polarisation transmittiert und s-Polarisation zum Spiegel 36 reflektiert wird.

[0063] Die Ausführungsform gemäß Fig. 4 zeichnet sich gegenüber den obigen Ausführungsformen dadurch aus, dass das Austrittslicht der Lichtmischeinrichtung 50 im wesentlichen rechtwinklig zur Längsachse des Integratorstabes 51 abgegeben wird. Das Spiegelprisma 52 ist hinter dem Strahlteilerblock 53 in Verlängerung des Integratorstabes 51 so angeordnet, dass Licht mit p-Polarisation, welches durch die Strahlteilerfläche 54 ungehindert hindurchgeht, um 90° nach unten gelenkt wird. Die s-Komponente des in den Strahlteilerblock eintretenden Lichts wird an der Teilerfläche 54 rechtwinklig nach unten umgelenkt und durch eine nachgeschaltete  $\lambda/2$ -Platte 55 in Licht mit p-Polarisation verlustfrei umgewandelt. Es ist leicht zu erkennen, dass die Anordnung zur Abgabe von spolarisiertem Licht umgerüstet werden kann, indem die Verzögerungsplatte 55 vom Ausgang des Polarisationssteilerblocks 53 entfernt und hinter dem Ausgang des Spiegelprismas 52 angebracht wird.

[0064] Die hier demonstrierte Möglichkeit, bei einer winkelerhaltenden Lichtmischeinrichtung mit Integratorstab die Lichtaustrittsrichtung wahlweise in Verlängerung des Stabes oder senkrecht dazu anzuordnen, erhöht die Freiheitsgrade bei der Konstruktion mit erfindungsgemäßen Lichtmischeinrichtungen ausgestatteter Beleuchtungssysteme.

[0065] Die Ausführungsform einer Lichtmischeinrichtung 60 in Fig. 5 ist bezüglich Integratorstab 20 und Prismenanordnung 30 identisch zur Ausführungsform gemäß Fig. 1 und 2 gestaltet. Im Unterschied zu dieser ist an den Austrittsflächen von Strahlteilerblock 35 und Spiegelprisma 33 jeweils eine  $\lambda/4$ -Verzögerungsplatte 61, 62 angesprengt. Dadurch wird das aus der Prismenanordnung austretende, linear polarisierte Licht mit s- bzw. p-Polarisation jeweils in Licht mit zirkularer Polarisation umgewandelt, und zwar mit gleichläufigem Drehsinn der beiden Strahlen.

[0066] Zirkular polarisiertes Licht, dessen Eigenschaften ähnlich denjenigen von unpolarisiertem Licht sind, kann, gegebenenfalls ohne Zwischenschaltung eines REMA-Objektivs, direkt auf ein Retikel aufgestrahlt werden und vermeidet die Entstehung von sogenannten H-V-Differenzen am Retikel, welche auftreten können, wenn bei Verwendung von linear polarisiertem Licht die typische Strukturbreite am Retikel in der Größenordnung der verwendeten Lichtwellenlänge liegen. Bei Verwendung eines Projektionsobjektivs mit Polarisationsstrahlteiler müsste das Licht dann vor Eintritt in den Strahlteilerblock durch eine weitere  $\lambda/4$ -Platte oder dergleichen in linear polarisiertes Licht geeignete Ausrichtung umgewandelt werden. Vorzugsweise stehen eine  $\lambda/4$ -Platte vor dem Retikel und eine dem Retikel folgende  $\lambda/4$ -Platte exakt senkrecht zueinander. Dadurch kann die unvollständige  $\lambda/4$ -Wirkung bei sehr großer Apertur durch die nachfolgende  $\lambda/4$ -Platte vollständig kompensiert werden.

siert werden.

[0067] Zirkular polarisiertes Licht ist auch vorteilhaft in Verbindung mit einteiligen REMA-Objektiven ohne internen Spiegel nutzbar.

[0068] Die gegebenenfalls hohe Apertur im Integratorstab stellt bei Prismenanordnungen mit Polarisationssteilerschicht besonders hohe Anforderungen an die Winkelbelastbarkeit der Polarisationssteilerschicht. Diese sollte ihre polarisationsselektive Wirkung über einen möglichst großen Winkelbereich um eine Einstrahlrichtung bereitstellen. Zudem ergeben sich bei Systemen für kürzeste Arbeitswellenlängen, beispielsweise 193 nm oder 157 nm, Materialprobleme bei den Schichtmaterialien. Während für 193 nm bei einigen geeigneten Schichtmaterialien die Absorptionskante noch genügend weit entfernt ist, so dass die Materialien nicht oder nur geringfügig absorbieren, reduziert sich bei 157 nm die Auswahl geeigneter Schichtmaterialien im wesentlichen auf Magnesiumfluorid und Vertreter als niedrig brechendes Schichtmaterial und auf Lanthanfluorid, Bariumfluorid und vergleichbare Materialien als hochbrechendes Schichtmaterial. Die größte Winkelbandbreite ist durch eine möglichst große Brechzahl Differenz der Schichtmaterialien erzielbar. Da aufgrund der begrenzten Materialauswahl insbesondere bei 157 nm nur geringe Brechzahl Differenzen erzielbar sind, bleibt als Maßnahme bei der Polarisationssteilerschicht im wesentlichen nur, die Zahl der Schichtpaare hochbrechend/niedrigbrechend zu erhöhen. Dies bringt herstellungstechnische und Lebensdauer-Probleme; zudem lässt sich die Winkelbelastbarkeit dadurch nicht beliebig erhöhen.

[0069] Diese Probleme können durch Senkung der inneren Apertur des Integratorstabes entschärft werden, was zu einer Verminderung der Winkelbelastung der Polarisationssteilerschicht führt. Eine hiermit verbundene Querschnittsvergrößerung eines Integratorstabes würde bei unveränderter Baulänge eines Stabes die Zahl der Reflexionen vermindern, wodurch die Durchmischung und die Uniformität der Beleuchtung am Retikel leiden würde. Ein Ausgleich durch größere Baulängen kann zu konstruktiven Schwierigkeiten in der Einbauumgebung führen; außerdem sind Transmissionsverluste durch Absorption über den längeren Weg im Stabmaterial, herkömmlich Kalziumfluorid oder Quarzglas, die Folge.

[0070] Um bei verringerter Apertur des Stabes ausreichenden Transmissionswirkungsgrad und gute Durchmischung zu erhalten, können einzelne oder mehrere der folgend beschriebenen Maßnahmen alternativ oder kumulativ eingesetzt werden. Eine Maßnahme besteht darin, beim Stabmaterial vom herkömmlich verwendeten Kalziumfluorid auf Magnesiumfluorid zu wechseln, was die Transmission verbessert, da Magnesiumfluorid ein deutlich höheren Abstand zur Absorptionskante aufweist. Eine hierdurch eingeführte Doppelberechnung im Stabmaterial ist unproblematisch, da durch die nachgeschaltete Prismenanordnung ohnehin ein gewünschter Polarisationszustand verlustfrei wiederherstellbar ist. Weiterhin kann, gegebenenfalls unter Beibehaltung der herkömmlichen Baulänge, zwischen Stabeintritt und Austrittsfläche der Lichtmischeinrichtung eine Stabanordnung mit mindestens zwei Integratorstäben vorgesehen sein, zwischen denen mindestens eine winkelerhaltende Umlenkrichtung vorgesehen ist. Auf diese Weise sind einfache oder mehrfache Faltungen des Lichtweges innerhalb der Lichtmischeinrichtung möglich. Bei mehr als zwei Faltungen ist neben einer flächigen Faltung auch eine räumliche Faltung denkbar.

[0071] Die Ausführungsform in Fig. 6 hat eine Lichtmischeinrichtung 70 mit vier Integratorstäben 71, 72, 73, 74, zwischen denen zur Umlenkung der Lichtlaufrichtung um jeweils 90° jeweils winkelerhaltende Umlenkrichtungen

gen in Form von gleichschenkeligen 90°-Umlenkprismen 75, 76, 77 vorgesehen sind. Die Lichteintritts- und -austrittsflächen grenzen jeweils an Gas. Hinter dem Austritt des letzten Integratorstabes 74 ist eine Prismenanordnung 78 ähnlich der Anordnung gemäß Fig. 4 gezeigt, welche die Austrittsrichtung der beiden gleich polarisierten Strahlen senkrecht zur Längsachse des letzten Integratorstabes 74 und parallel zur Einstrahlrichtung am Eintritt des ersten Stabes 71 ausrichtet. Hinter der Lichtmischeinrichtung, die zur Abgabe von spolarisiertem Licht ausgebildet ist, befindet sich ein geteiltes REMA-Objektiv 79 mit Umlenkspiegel. Der axiale Bauraum (Abstand zwischen Eintrittsfläche des ersten Integratorstabes 71 und Lichtaustritt an der Prismenanordnung) ist bei dieser Ausführungsform nur etwa halb so groß wie der gesamte Lichtweg, der sich im wesentlichen aus der Gesamtlänge der Integratorstäbe und der durchstrahlten Längen der Umlenkprismen sowie der Prismenanordnung ergibt.

[0072] Die Ausführungsform einer Lichtmischeinrichtung 80 in Fig. 7 zeigt beispielhaft, dass auf kleinem Bauraum durch Parallelanordnung von zwei (oder mehreren) Integratorstäben 81, 82 ein großer Lichtweg möglich ist, der ein Vielfaches des direkten Abstandes zwischen Eintritt im Integratorstab und Austritt an der Prismenanordnung betragen kann. Eine 180°-Umlenkung zwischen den Integratorstäben wird durch zwei identisch dimensionierte, spiegelbildlich angeordnete, total reflektierende Umlenkprismen 83, 84 zwischen Austritt des ersten Stabes 81 und Eintritt des zweiten Stabes 82 erreicht. Zwischen den Integratorstäben und zwischen diesen und den zugeordneten Umlenkprismen besteht jeweils ein ausreichender kleiner Luftabstand, um Totalreflexion innerhalb der geradflächig begrenzten optischen Komponenten zu ermöglichen.

[0073] Eine andere, alternativ oder zusätzlich zu den beschriebenen Maßnahmen anwendbare Maßnahme besteht darin, einen Integratorstab ggf. in seiner Länge zu belassen, durch Querschnittserhöhung die innere Apertur zu senken und am Stab mindestens einen geteilten Stababschnitt vorzusehen, der zwei oder mehr total reflektierende Stäbchen aufweist, deren Gesamtquerschnitt im wesentlichen dem ursprünglichen Stabquerschnitt entspricht. Durch die Querschnittsverringern in den Stäbchen des geteilten Stabquerschnittes wird insgesamt die Zahl der Reflexionen erhöht, so dass die austrittsseitige Uniformität verbessert werden kann. Ein Beispiel eines solchen Integratorstabes 90 ist in Fig. 8 gezeigt. Er hat einen eintrittsseitigen ersten Stababschnitt 91 mit drei identisch dimensionierten Stäbchen 92, einen darauf folgenden zweiten geteilten Stababschnitt 93, der auf gleichem Querschnitt nur zwei identische Stäbchen 94 hat, sowie austrittsseitig einen ungeteilten Stababschnitt 95, dessen Länge so dimensioniert ist, dass eine ausreichende Durchmischung insgesamt gewährleistet ist. Statt der beispielhaft gezeigten, zweifach gestuften Teilung ist es auch möglich nur einen geteilten Abschnitt und einen ungeteilten Stababschnitt vorzusehen oder mehr als zwei geteilte Abschnitte, die einem ungeteilten Stababschnitt vorangehen. Auch hier ist darauf zu achten, dass die lateral einander gegenüberliegenden Grenzflächen der Stäbchen einen geringen Abstand zueinander haben, so dass sie total reflektierend wirken können.

[0074] Bei Verwendung einer Polarisationssteilerschicht, die schräg zur Ausbreitungsrichtung eines geöffneten Lichtbündels ausgerichtet ist, wird der Polarisationsgrad der durchtretenden Strahlung über den Öffnungswinkel bzw. die Apertur der Strahlen variieren, und zwar unsymmetrisch zu der der Ausbreitungsrichtung entsprechenden Richtung (entsprechend Apertur NA = 0). Dies wird anhand von Fig. 9 verdeutlicht, wo gezeigt ist, dass bei einem geöffneten

Strahlbüschel 100, welches sich parallel zur Längsachse 101 eines Integratorstabes 102 ausbreitet, die Randstrahlen des Strahlbüschels mit unterschiedlichen Inzidenzwinkeln auf die Polarisationssteilerschicht 103 auffallen. Dabei variiert der Inzidenzwinkel (Winkel zwischen Einfallrichtung und Flächennormalen der Polarisationssteilerschicht) symmetrisch um den Inzidenzwinkel der Einfallrichtung (normalerweise ca. 45°). Da jedoch der Transmissionsgrad einer Polarisationssteilerschicht normalerweise nicht symmetrisch um den mittleren Einfallswinkel (typischerweise im Bereich von 45°, nahe dem Brewster-Winkel) variiert, ergibt sich für die Strahlen des Büschels insgesamt in Bezug auf die Einstrahlrichtung (NA = 0) eine unsymmetrische Transmission T für p-polarisiertes Licht. Diese Situation ist schematisch in Fig. 10 (a) gezeigt.

[0075] Die asymmetrische Polarisation für die geöffneten Büschel wird durch einen spiegelsymmetrischen Aufbau der Polarisationssteilerschichten in Bezug auf diese Spiegelebene kompensiert, welche in Längsrichtung des Stabes verläuft und eine Schnittlinie zwischen den Polarisationssteilerflächen enthält. Durch diese Anordnung ergibt sich am Austritt eine zur Einstrahlrichtung symmetrische Verteilung des Gesamt-Transmissionsgrades für p-Polarisation (Fig. 10(b)). Erreicht wird dies im gezeigten Beispiel durch eine Prismenanordnung 105, die eine erste Prismengruppe 106 und eine zweite Prismengruppe 107 aufweist, wobei die beiden Prismengruppen spiegelsymmetrisch zu der genannten Spiegelebene des Integratorstabes 102 angeordnet sind. Jede Prismengruppe ist im wesentlichen gleich aufgebaut wie die Prismenanordnung 30 in Fig. 3, wobei die spiegelsymmetrisch zueinander liegenden zweiten Prismen 32 hinter den im rechten Winkel zueinander ausgerichteten Polarisationssteilerschichten 103, 104 zu einem einzigen Prisma 108 integriert sind. Diese Prismenanordnung hat zwei spiegelsymmetrisch zur Spiegelfläche des Integratorstabes ausgerichtete, jeweils um ca. 45° zur Längsachse des Stabes ausgerichtete Polarisationssteilerflächen 103, 104, deren asymmetrische Wirkungen auf die einfallende Strahlung sich gegenseitig kompensieren.

[0076] Durch ein entsprechendes Apodisierungsfilter im REMA-Objektiv lässt sich dieser Wert des Polarisationsgrades gleichmäßig über die Pupille einstellen. Eine Apodisierung ist jedoch in Regel weder notwendig noch zweckmäßig. Für den Interferenzkontrast, der bei den hier im Vordergrund stehenden Beleuchtungsarten Ringfeld und Dipolbeleuchtung maximiert werden soll, ist der Abgleich der Teilintensitäten von miteinander interferierenden Strahlen schon durch den vorgeschlagenen symmetrischen Aufbau erreicht. Da ein Apodisierungsfilter in aller Regel Licht vernichtet, kann es Dank der symmetrischen Prismenanordnung weggelassen werden. Der symmetrische Aufbau einer Prismenanordnung gemäß Fig. 9 verkleinert bei vergrößerter Stabgeometrie wieder die Prismen um einen Faktor 2. Dies kann vorteilhaft sein, da die einzelnen Prismen zwar bestmöglich bezüglich Kristallorientierung eingesetzt werden müssten, es kann aber, insbesondere bei 157 nm, ein unkompensierbarer, aperturbedingter Beitrag der intrinsischen Doppelbrechung bleiben. Bei größeren Wellenlängen, beispielsweise 193 nm, ist dies kein Problem, da hier Prismen aus synthetischem Quarzglas ohne intrinsische Doppelbrechung verwendet werden können. Dementsprechend ist hier, wie bei allen anderen Ausführungsformen, eine Kombination unterschiedlicher geeigneter Materialien für Integratorstab und die Prismen von Prismenanordnungen und Umlenkeinrichtungen möglich.

[0077] Anhand von Fig. 11 wird beispielhaft ein möglicher Gesamtaufbau der optischen Komponenten einer Projektionsbelichtungsanlage 110 gezeigt, welche ein Beleuch-

tungssystem 111 zur Beleuchtung einer Photomaske 112 sowie ein Projektionsobjektiv 113 zur Abbildung der Photomaske auf einen in der Bildebene 114 des Projektionsobjektivs angeordneten Wafer umfasst. Das Beleuchtungssystem hat als Lichtquelle einen gepulsten Laser 115, hinter dem eine um die optische Achse des Systems drehbare  $\lambda/2$ -Platte 116 angeordnet ist. Eine dieser nachgeschaltete Optik 117 überträgt das Licht in die winkelerhaltende, polarisationsoptimierte Lichtmischeinrichtung 118, die bezüglich Aufbau und Funktion der Lichtmischeinrichtung 10 in Fig. 1 im wesentlichen entspricht und zur Abgabe von vollständig s-polarisiertem Licht ausgebildet ist. Das voll polarisierte Austrittslicht trifft ohne Zwischenschaltung eines REMA-Objektivs direkt auf die Photomaske 112. Wenn eine Beleuchtung der Maske mit zirkular polarisiertem Licht gewünscht ist, kann vor und hinter der Maske jeweils eine  $\lambda/4$ -Platte angeordnet sein. Das hinter der Maske 112 s-polarisierte Licht trifft auf eine schräg im Lichtweg angeordnete Polarisationssteilerschicht 117 eines Strahlteilerblocks 118 des Projektionsobjektivs und wird Richtung Konkavspiegel 119 des Objektivs umgelenkt. Eine zwischen Strahlteilerblock und Konkavspiegel angeordnete  $\lambda/4$ -Platte 120 sorgt dafür, dass der Konkavspiegel und die vorgeschalteten Linsen mit zirkular polarisiertem Licht betrieben werden, während das auf die Strahlteilerfläche 117 rückreflektierte Licht p-polarisiert ist und somit von der Schicht 117 in Richtung eines dem Strahlteilerwürfel nachgeschalteten, dioptrischen Objektivteils des Projektionsobjektivs durchgelassen wird. Dieser kann einen Umlenkspiegel 121 enthalten, um eine Parallelstellung von Photomaske 112 und Wafer 114 zu erreichen. Eine optionale  $\lambda/2$ -Platte zwischen Strahlteilerwürfel und Umlenkspiegel kann dafür sorgen, dass der Spiegel 121 mit s-Polarisation betrieben wird, um dessen Reflexionsgrad zu erhöhen. Eine in Richtung Wafer nachfolgende  $\lambda/4$ -Platte 122 sorgt für eine Beleuchtung des Wafers und vorgeschaltete Objektivlinsen mit zirkular polarisiertem Licht.

[0078] Bei der Mikrolithographie mit gepulsten Lasern ist eine gute Lichtstabilität zwischen den einzelnen Lichtpulsen des Lasers 8 erwünscht, da nur eine endliche Anzahl von Pulsen beim Scannen zu einer Belichtung beiträgt. Um die beiden übereinander liegenden Scanfelder inversiv auszuleuchten, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die einfachste besteht darin, die Polarisation des Eingangslichtes zwischen einzelnen Pulsen oder Pulsgruppen jeweils um 90° zu drehen. Damit invertiert jeder Punkt in der Gesamtaustrittsfläche 11 der Lichtmischeinrichtung laufend von Puls zu Puls bzw. von Pulsgruppe zu Pulsgruppe seine Helligkeit derart, dass zwei zugeordnete Pulse oder Pulsgruppen einen zeitlichen Mittelwert ergeben, der frei von jeglichen Polarisationsseigenschaften den Mittelwert der abgegebenen Pulse aus dem Laser repräsentiert. Dementsprechend ist bei Verwendung von gepulsten Lasern vorzugsweise zwischen der Lichtquelle und dem Integratorstab eine Einrichtung zur Drehung der Polarisationsrichtung des vom Laser abgegebenen Lichtes vorgesehen, z. B. eine drehbare  $\lambda/2$ -Platte 116. Diese wird bevorzugt so angesteuert, dass während eines Belichtungsintervalls Licht mit unterschiedlichen Ausrichtungen der Polarisationsvorzugsrichtung etwa gleich häufig in die Lichtmischeinrichtung eintritt. Damit wird eine zeitliche Mithlung verschiedener Polarisationszustände am Austritt erreicht.

[0079] Die Anlage kann mit höchsten Wirkungsgrad bei allen Beleuchtungsarten, insbesondere Ringfeld-, Quadrupol- oder Dipolbeleuchtung betrieben werden. Der Einsatz von Phasenmasken ist uneingeschränkt möglich. Durch den Scan-Modus (in y-Richtung) ist die Retikelebene faktisch völlig gleichmäßig ausgeleuchtet. Durch Ansteuerung der rotierenden  $\lambda/2$ -Platte 116 in der Weise, dass während eine

Belichtungsintervalls etwa gleich viele Pulse mit orthogonal zueinander ausgerichteten Polarisationsvorzugsrichtungen durchgelassen werden, wird im zeitlichen Mittel eine gleichmäßige Beleuchtung beider Ausgänge der Lichtmischeinrichtung 118 erreicht. Zahlreiche Variante des Systems, beispielsweise mit REMA-Objektiv zwischen Lichtmischeinrichtung und Retikellebene sind ebenfalls möglich. [0080] Bei Verwendung von abbildenden Optiken zwischen Lichtmischeinrichtung und Retikel ist zu beachten, dass der am Austritt der Lichtmischeinrichtung ideal präparierte Polarisationszustand, beispielsweise mit s- oder p-Polarisation, durch optische Komponenten innerhalb des nachfolgenden Objektivs noch verändert werden kann, beispielsweise durch intrinsische Spannungsdoppelbrechung im Linsenmaterial. Dies Problem kann durch Verwendung eines anhand Fig. 12 beispielhaft erläuterten Polarisationsfilters 130 vermindert werden, welches hier als Zwischenpolarisator dient, um den eingangs des Objektivs 131 optimal präparierten Polarisationszustand mit p-Polarisation wieder "aufzufrischen". Das Polarisationsfilter hat eine Prismenanordnung mit mindestens drei, normalerweise deutlich mehr, im wesentlichen gleichschenkeligen Prismen, die ineinandergreifend so angeordnet sind, dass einander zugewandte Kathetenflächen der Prismen eine den gesamten Querschnitt des Filters übergreifende Zick-Zack-Anordnung bilden. Die Prismen sind bezüglich ihrer Hypotenusen im wesentlichen senkrecht zur optischen Achse nebeneinander liegend angeordnet. Die gesamte Prismenanordnung ist hier auf einem gesonderten, planparallelen, transparenten Träger 143 befestigt, der gegebenenfalls auch einstückig mit den darauf angebrachten Prismen ausgebildet sein kann. [0081] Zwischen den einander gegenüberliegenden Kathetenflächen ist jeweils eine Polarisationssteilerschicht angeordnet. Dadurch entstehen lückenlos aneinander grenzende Paare von Polarisationssteilerschichten 140, 141, wobei die Schichten eines Paares jeweils unter Einschluss eines Winkels von ca. 90° derart in Richtung des einfallenden Lichts geneigt sind, dass von einer Polarisationssteilerfläche des Paares reflektiertes (s-polarisiertes) Licht in Richtung der zugeordneten anderen Polarisationssteilerfläche umgelenkt und von dieser nochmals umgelenkt wird in eine Ausbreitungsrichtung, die im wesentlichen gegenparallel zur Einfallrichtung des Lichts verläuft. Somit ist ein polarisationsselektiver Retro-Reflektor geschaffen, der (im Schnitt) nach Art eines (zweidimensionalen) Katzenauges arbeitet, nur Licht mit p-Polarisation durchlässt und s-polarisiertes Licht vollständig rückreflektiert. Die gezeigte Form hat einen hohen Wirkungsgrad auch bei erheblicher Winkelbelastung, da keine geometrische Abschattung stattfindet. [0082] Dieses Prinzip der Zwischenpolarisierung verschlechtert nicht die Uniformität im Retikel, da der Zwischenpolarisator 130 im Bereich der Pupille des REMA-Objektivs und damit an einem zur Ort der Projektionsobjektiv-Pupille konjugiertem Ort liegt. Der Zwischenpolarisator kann an seinem Ausgang mit einem optischen Element 150 zur Erzeugung einer gewünschten Ausgangspolarisation aus dem hinter dem Zwischenpolarisator ideal p-polarisierten Licht kombiniert werden. Es kann sich beispielsweise um eine Rasterplatte mit einer Vielzahl von geeigneten orientierten  $\lambda/2$ -Facetten zur Herstellung von tangentialer Polarisation handeln. Ein solches Bauteil ist beispielsweise in der DE 195 35 392 offenbart, dessen Offenbarungsgehalt insoweit durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Beschreibung gemacht wird. [0083] Ein Polarisationsfilter nach Art des Polarisationsfilters 130 kann unabhängig von den sonstigen hier beschriebenen Merkmalen der Erfindung auch in anderen optischen Einrichtungen eingesetzt werden, um aus weitgehend

senkrecht zur Filterebene auftreffendem Licht mit beliebigem Polarisationszustand Komponenten mit s-Polarisation durch Rückreflexion zu blockieren und nur p-Polarisation durchzulassen. Eine Anordnung im Bereich kleiner Winkelbelastungen, beispielsweise im Bereich einer Pupille eines Objektivs, ist vorteilhaft für einen hohen Filter-Wirkungsgrad.

#### Patentansprüche

1. Beleuchtungssystem für eine optische Einrichtung, insbesondere für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie, mit einer Lichtmischeinrichtung, die folgende Merkmale aufweist:  
mindestens einen Integratorstab, der eine Eintrittsfläche zum Empfang von Licht einer Lichtquelle und eine Austrittsfläche zur Abgabe von durch den Integratorstab gemischten Austrittslicht aufweist, sowie  
mindestens eine Prismenanordnung zum Empfang von Austrittslicht und zur Veränderung des Polarisationszustandes des Austrittslichts, wobei die Prismenanordnung mindestens eine quer zur Ausbreitungsrichtung des Austrittslichts ausgerichtete Polarisationssteilerfläche aufweist.
2. Beleuchtungssystem nach Anspruch 1, bei dem die Prismenanordnung mindestens eine Spiegelfläche aufweist, die in Bezug auf die Polarisationssteilerfläche entweder derart angeordnet ist, daß von der Polarisationssteilerfläche reflektiertes Licht mit Hilfe der Spiegelfläche in eine Ausbreitungsrichtung umlenkbar ist, die im wesentlichen parallel zur Ausbreitungsrichtung des von der Polarisationssteilerfläche durchgelassenen Lichtes verläuft oder derart angeordnet ist, daß von der Polarisationssteilerfläche durchgelassenes Licht mit Hilfe der Spiegelfläche in eine Ausbreitungsrichtung umlenkbar ist, die im wesentlichen parallel zur Ausbreitungsrichtung des von der Polarisationssteilerfläche reflektierten Lichtes verläuft.
3. Beleuchtungssystem nach Anspruch 1 oder 2, bei dem an der Polarisationssteilerfläche eine optisch wirksame Polarisationssteilerschicht angeordnet ist, die vorzugsweise ein optisch wirksames Mehrschichtsystem mit Schichten aus abwechselnd hochbrechendem oder niedrigbrechendem, transparenten dielektrischen Material aufweist.
4. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Prismenanordnung einen Polarisationssteilerblock mit einem ersten und einem zweiten Prisma aufweist, die einander zugewandte Grenzflächen aufweisen, zwischen denen die Polarisationssteilerfläche, insbesondere die Polarisationssteilerschicht, angeordnet ist.
5. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 2 bis 4, bei dem die Prismenanordnung mindestens ein als Spiegelprisma dienendes Prisma aufweist, bei dem eine Grenzfläche die Spiegelfläche bildet, wobei die Spiegelfläche vorzugsweise total reflektierend ist.
6. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Prismenanordnung mindestens eine Baugruppe mit drei Prismen aufweist, wobei zwei der drei Prismen einander zugewandte Hypotenusenflächen haben, zwischen denen die Polarisationssteilerfläche liegt und das dritte Prisma eine Hypotenusenfläche hat, welche die Spiegelfläche bildet.
7. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Prismenanordnung für den Lichteintritt oder Lichtaustritt vorgesehene Grenzflächen hat und mindestens ein Teil der Grenzflächen mit

einer Entspiegelungsschicht belegt ist.

8. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 4 bis 7, bei dem zwischen der Austrittsfläche des Integratorstabes und einer Eintrittsfläche des Polarisationssteilerblocks und/oder zwischen einer Lichtaustrittsfläche des Polarisationssteilerblocks und einem Umlenkprisma ein materialfreier Spalt gebildet ist, wobei der Spalt vorzugsweise eine Spaltbreite hat, die in der Größenordnung einiger Wellenlängen der verwendeten Lichtwellenlänge liegt.

9. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Prismenanordnung mindestens eine erste Austrittsfläche zum Austritt von durch die Polarisationssteilerfläche transmittiertem Licht und mindestens eine zweite Austrittsfläche zum Austritt von durch die Polarisationssteilerfläche reflektiertem Licht aufweist, wobei mindestens einer der Austrittsflächen eine optische Einrichtung zur Änderung des Polarisationszustandes von durchtretendem Licht nachgeschaltet ist, insbesondere ein Verzögerungselement.

10. Beleuchtungssystem nach Anspruch 9, bei dem einer der Austrittsflächen eine Einrichtung zur Drehung der Polarisationsvorzugsrichtung des durchtretenden Lichts um  $90^\circ$  nachgeschaltet ist, insbesondere in Form einer Halbwellenlängenplatte.

11. Beleuchtungssystem nach Anspruch 8 oder 9, bei dem beiden Austrittsflächen jeweils eine Einrichtung zur Umwandlung von eintretenden linear polarisierten Licht in zirkular polarisiertes Licht, insbesondere eine Viertelwellenlängenplatte, nachgeschaltet ist.

12. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Polarisationssteilerfläche derart ausgerichtet ist, daß eine Schnittlinie zwischen der Polarisationssteilerfläche und einer senkrecht zur Austrittsrichtung des Lichts ausgerichteten Ebene quer, insbesondere senkrecht zu einer Richtung (y-Richtung) liegt, die einer Scanrichtung eines Wafer-Scanners zugeordnet ist.

13. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Prismenanordnung eine erste Prismengruppe mit einer ersten Polarisationssteilerfläche und eine zweite Prismengruppe mit einer zweiten Polarisationssteilerfläche aufweist, wobei die erste und die zweite Prismengruppe spiegelsymmetrisch zu einer Spiegelebene des Integratorstabes angeordnet sind.

14. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Lichtmischeinrichtung winkelerhaltend ist, eine Eintrittsfläche mit einem Eintrittsflächenquerschnitt und einer Austrittsfläche mit einem vom Eintrittsflächenquerschnitt abweichenden Austrittsflächenquerschnitt aufweist.

15. Beleuchtungssystem nach Anspruch 14, bei dem der Austrittsflächenquerschnitt größer als der Eintrittsflächenquerschnitt ist, wobei vorzugsweise der Austrittsflächenquerschnitt ein ganzzahliges Vielfaches des Eintrittsflächenquerschnitts ist.

16. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Prismenanordnung derart angeordnet ist, daß die Ausbreitungsrichtung des aus der Lichtmischeinrichtung austretenden Lichts quer, vorzugsweise im wesentlichen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des in die Lichtmischeinrichtung einfallenden Lichts verläuft.

17. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem als Lichtquelle ein gepulster Laser zur Abgabe einer Vielzahl von Laserpulsen vor-

gesehen ist, wobei zwischen der Lichtquelle und der Lichtmischeinrichtung eine Einrichtung zur Drehung der Polarisationsrichtung des Lichtes der Lichtquelle angeordnet ist, insbesondere eine drehbare Halbwellenlängenplatte, und wobei die Einrichtung zur Drehung des Lichts derart angesteuert oder ansteuerbar ist, daß während eines Belichtungsintervalls abwechselnd Lichtpulse mit unterschiedlicher Ausrichtung der Polarisationsvorzugsrichtung, insbesondere mit orthogonal zueinander ausgerichteten Polarisationsvorzugsrichtungen, in die Lichtmischeinrichtung eintreten.

18. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem mindestens ein Integratorstab vorgesehen ist, der aus einem transparenten Material besteht, dessen Absorptionskante bei niedrigeren Wellenlängen liegt als die Absorptionskante von Kalziumfluorid, wobei als Stabmaterial vorzugsweise Magnesiumfluorid oder Lithiumfluorid verwendet wird.

19. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Lichtmischeinrichtung eine Integratorstabanordnung mit mehreren Integratorstäben aufweist und wobei an mindestens einer Stelle der Integratorstabanordnung zwischen einem ersten Integratorstab und einem nachfolgenden zweiten Integratorstab mindestens eine winkelerhaltende Umlenkeinrichtung zur Umlenkung der Lichtlaufrichtung vorgesehen ist, wobei die Umlenkeinrichtung vorzugsweise als Umlenkprisma ausgebildet ist.

20. Beleuchtungssystem nach Anspruch 19, bei dem die Integratorstabanordnung mindestens drei im Winkel zueinander angeordnete Integratorstäbe aufweist, zwischen denen jeweils eine Umlenkung, vorzugsweise um  $90^\circ$ , vorgesehen ist.

21. Beleuchtungssystem nach Anspruch 19 oder 20, bei dem die Integratorstabanordnung mindestens zwei Integratorstäbe aufweist, die im wesentlichen parallel zueinander ausgerichtet sind, wobei zwischen der Austrittsfläche eines vorgeschalteten Integratorstabes und der Eintrittsfläche eines nachgeschalteten Integratorstabes mindestens eine Umlenkeinrichtung vorgesehen ist.

22. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem mindestens ein Integratorstab vorgesehen ist, der einen ungeteilten Stababschnitt unmittelbar vor seiner Austrittsfläche und mindestens einen dem ungeteilten Stababschnitt vorgeschalteten, geteilten Stababschnitt aufweist, der mindestens zwei den Gesamtquerschnitt des Integratorstabes im wesentlichen ausfüllend, total reflektierende Stäbchen aufweist.

23. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Integratorstab aus einem ersten Material und mindestens ein Prisma der Prismenanordnung und/oder mindestens ein Umlenkprisma aus einem zweiten Material besteht, welches sich vom ersten Material unterscheidet.

24. Beleuchtungssystem nach Anspruch 23, bei dem das erste Material Kalziumfluorid, Magnesiumfluorid oder Lithiumfluorid ist.

25. Beleuchtungssystem nach Anspruch 23 oder 24, bei dem das zweite Material optisch isotrop ist, wobei als zweites Material vorzugsweise Kalziumfluorid, Bariumfluorid oder synthetisches Quarzglas verwendet wird.

26. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem ein Strahlteilerblock mit einem eintrittseitigen Prisma, einer Polarisationssteilerfläche und einem austrittsseitigen Prisma vorgesehen ist und bei dem das Material der Prismen in Abhängigkeit

von den Brechzahlverhältnissen in der Polarisationssteilerschicht so ausgewählt ist, dass ein Fehlwinkel zwischen der Einfallrichtung des auf die Polarisationssteilerschicht auffallenden Lichts und einer den Brewster-Winkel der Polarisationssteilerschicht entsprechenden Richtung im Hinblick auf maximalen Transmissionsgrad der Polarisationssteilerschicht für p-polarisiertes Licht optimiert, insbesondere minimiert ist.

27. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem auf mindestens einer für eine Reflexion vorgesehene Grenzfläche eines Integratorstabes und/oder der Prismenanordnung und/oder eines Umlenkprismas eine dünne Schicht mit phasenkorrigierender oder phasenerhaltender Wirkung aufgebracht ist.

28. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem auf mindestens einer für einen Lichteintritt oder Lichtaustritt vorgesehenen Grenzfläche eines Integratorstabes und/oder der Prismenanordnung und/oder eines Umlenkprismas eine phasenerhaltende oder phasenkorrigierende Beschichtung mit Entspiegelungswirkung aufgebracht ist.

29. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Lichtmischeinrichtung mindestens eine Blende zur Einstellung der örtlichen Verteilung der Energie eines durch die Lichtmischeinrichtung erzeugten Beleuchtungsfeldes zugeordnet ist, wobei die Blende vorzugsweise bewegliche Blendenelemente zur gesteuerten Veränderung der Breite eines Beleuchtungsfeldes als Funktion von Positionen entlang der Länge des Beleuchtungsfeldes aufweist.

30. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zwischen dem Austritt der Lichtmischeinrichtung und der Bildebene des Beleuchtungssystems kein optisches Abbildungssystem angeordnet ist.

31. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 29, bei dem zwischen dem Austritt der Lichtmischeinrichtung und der Bildebene des Beleuchtungssystems ein optisches Abbildungssystem mit mindestens einer Pupillenebene angeordnet ist, die eine Fouriertransformierte Ebene zur Bildebene des Beleuchtungssystems ist.

32. Beleuchtungssystem nach Anspruch 31, bei dem im Bereich der Pupillenebene ein Polarisationsfilter zur Beeinflussung des Polarisationszustandes von Licht vorgesehen ist, welches entlang einer senkrecht zu einer Filterebene verlaufenden Richtung auf das Polarisationsfilter einfällt, wobei das Polarisationsfilter ein polarisationsselektives Filter zur Transmission von Lichtanteilen einer Polarisationsrichtung und zur Blockierung von Lichtanteilen der anderen Polarisationsvorzugsrichtung ist.

33. Beleuchtungssystem nach Anspruch 32, bei dem das Polarisationsfilter als polarisationsselektiver Retroreflektor nach Art eines Katzenauges mit mehreren im Winkel zueinander angeordneten Polarisationssteilerflächen ausgebildet ist.

34. Beleuchtungssystem nach Anspruch 32 oder 33, bei dem das Polarisationsfilter eine Prismenanordnung mit mindestens einem Paar V-förmig angeordneter Polarisationssteilerflächen aufweist, die unter Einschluss eines Winkels von ca. 90° derart in Richtung des einfallenden Lichts geneigt sind, dass von einer Polarisationssteilerfläche des Paares reflektiertes Licht in Richtung der zugeordneten anderen Polarisationssteilerfläche umgelenkt und von dieser nochmals umgelenkt wird in eine Ausbreitungsrichtung, die im wesentlichen

gegenparallel zur Einfallrichtung des Lichts verläuft.

35. Beleuchtungssystem nach Anspruch 34, bei dem das Polarisationsfilter mehrere Paare V-förmig angeordneter Polarisationssteilerschichten aufweist, die einen gesamten Nutzquerschnitt des Filters übergreifende Zick-Zack-Anordnung bilden.

36. Polarisationsfilter, insbesondere für die Verwendung mit Ultraviolettlicht aus einem Wellenlängenbereich von weniger als 260 nm, zur Erzeugung von vollständig linear polarisiertem Licht aus Eingangslicht, welches im wesentlichen entlang einer optischen Achse des Polarisationsfilters einfällt, wobei das Polarisationsfilter als polarisationsselektiver Retroreflektor nach Art eines Katzenauges mit mehreren im Winkel zueinander angeordneten Polarisationssteilerflächen ausgebildet ist.

37. Polarisationsfilter nach Anspruch 36 mit den Merkmalen des kennzeichnenden Teils von mindestens einem der Ansprüche 34 und 35.

38. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie, dadurch gekennzeichnet, daß sie ein Beleuchtungssystem gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 34 umfasst.

39. Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen feinstrukturierten Bauteilen mit folgenden Schritten:

Bereitstellung einer Maske mit einem vorgegebenen Muster;

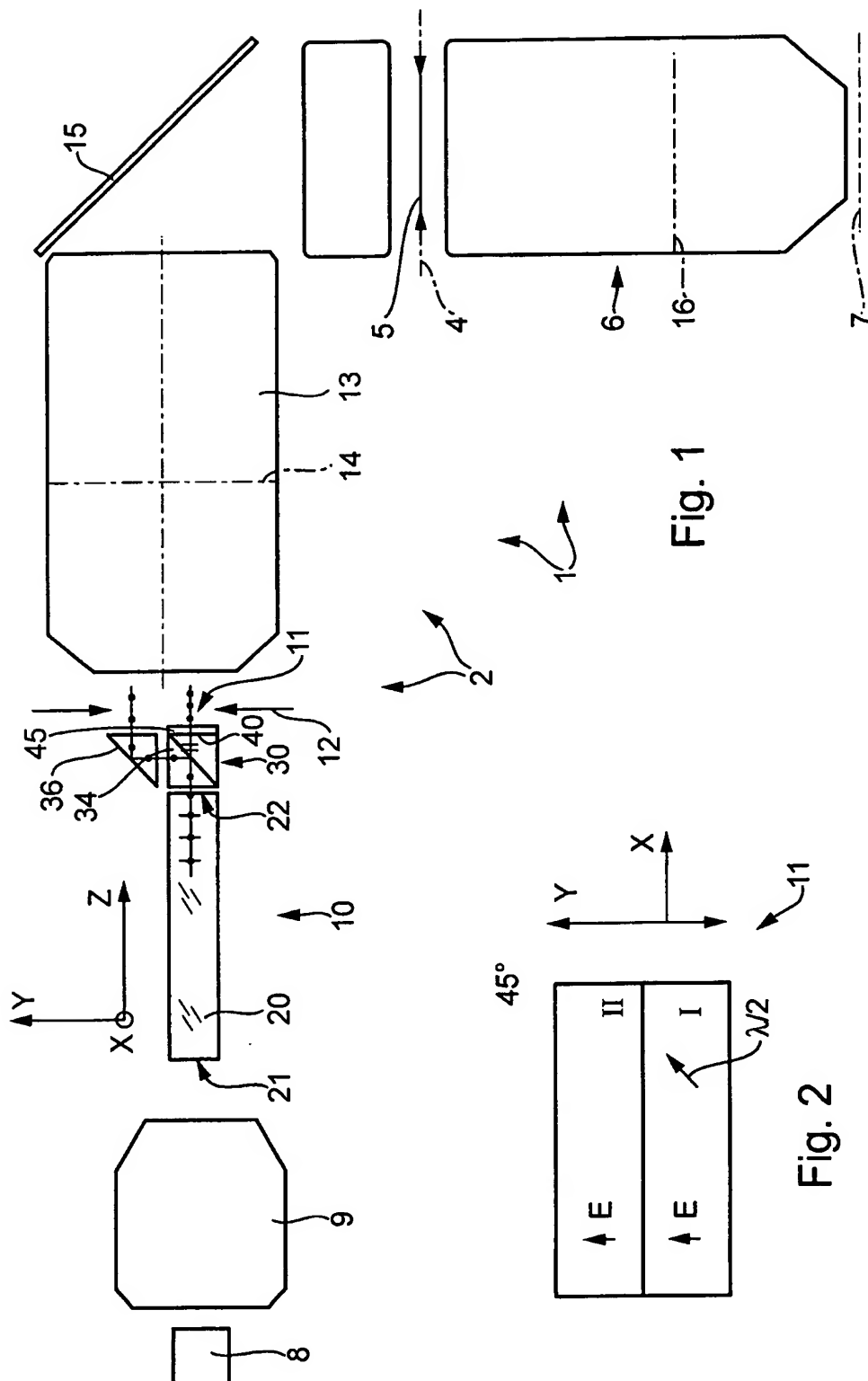
Beleuchtung der Maske mit Ultraviolettlicht einer vorgegebenen Wellenlänge mit Hilfe eines Beleuchtungssystems gemäß einem der Ansprüche 1 bis 34; und Projektion eines Bildes des Musters auf ein im Bereich der Bildebene eines Projektionsobjektivs angeordnetes, lichtempfindliches Substrat.

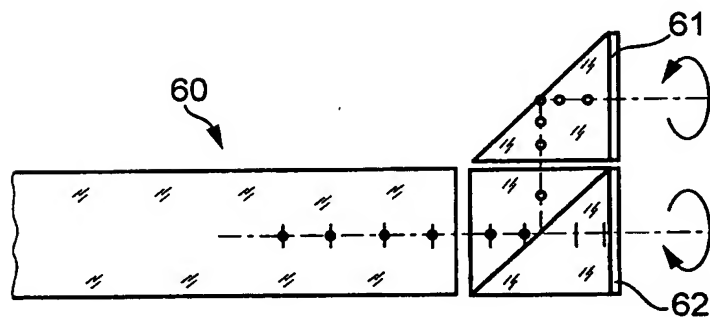
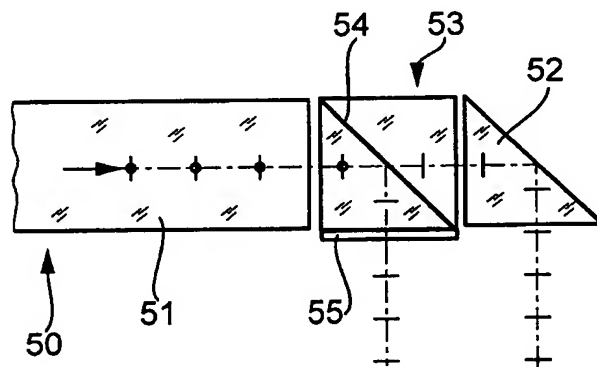
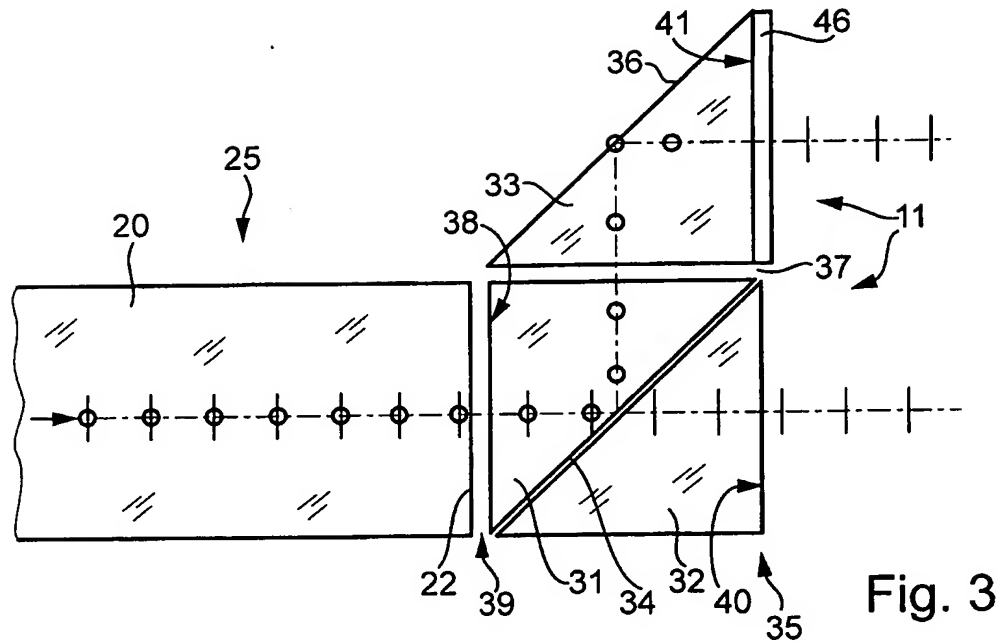
---

Hierzu 7 Seite(n) Zeichnungen

---

- Leerseite -





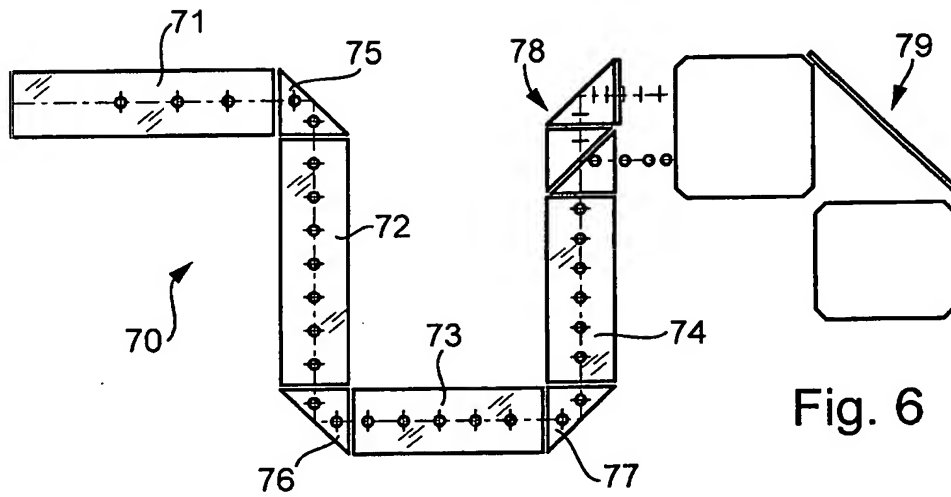


Fig. 6

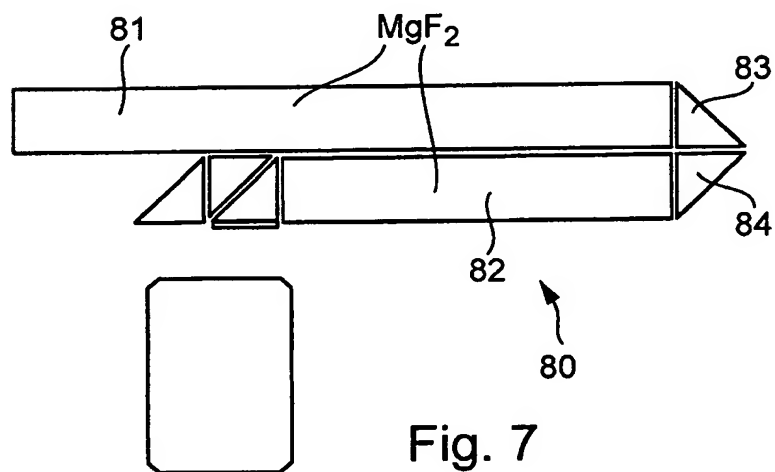


Fig. 7

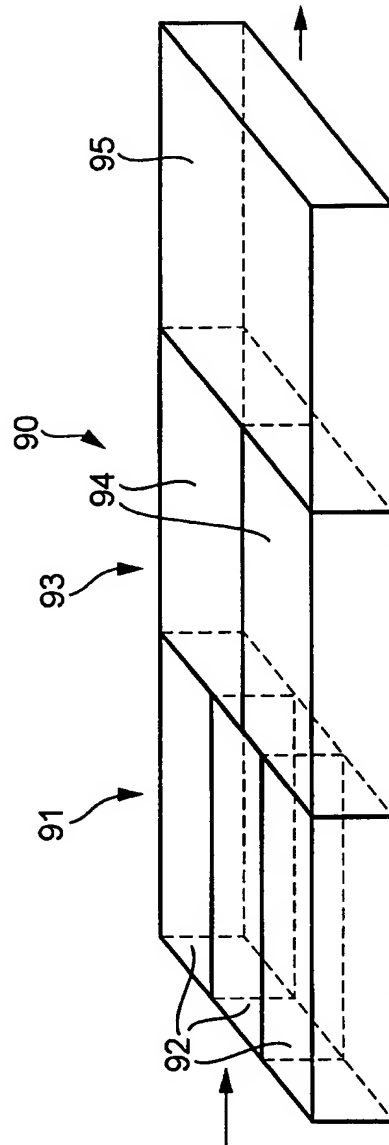


Fig. 8

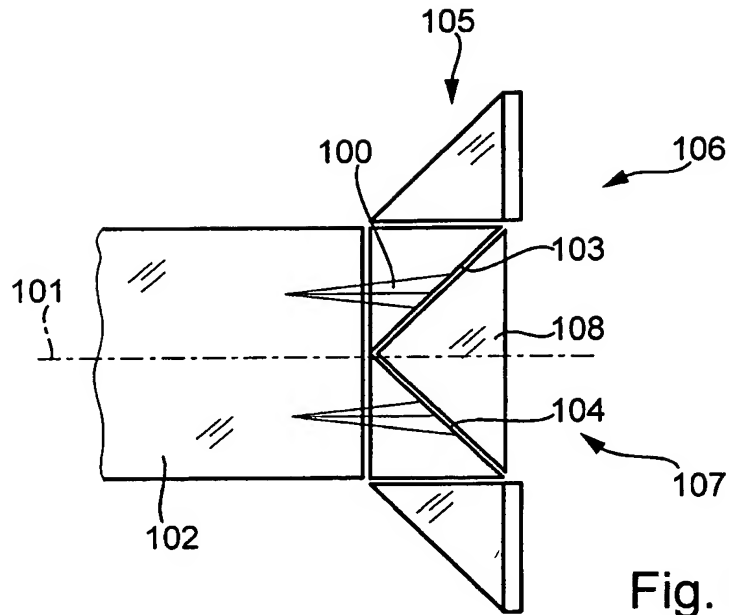


Fig. 9

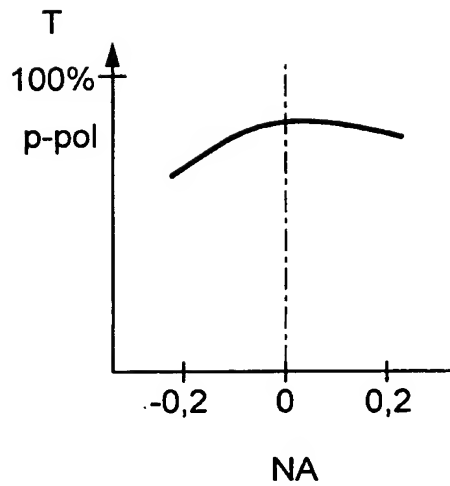


Fig. 10a

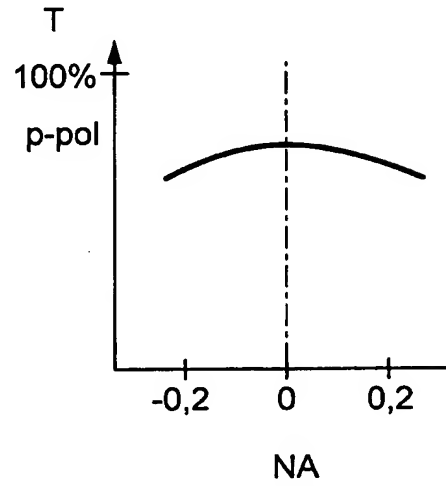


Fig. 10b

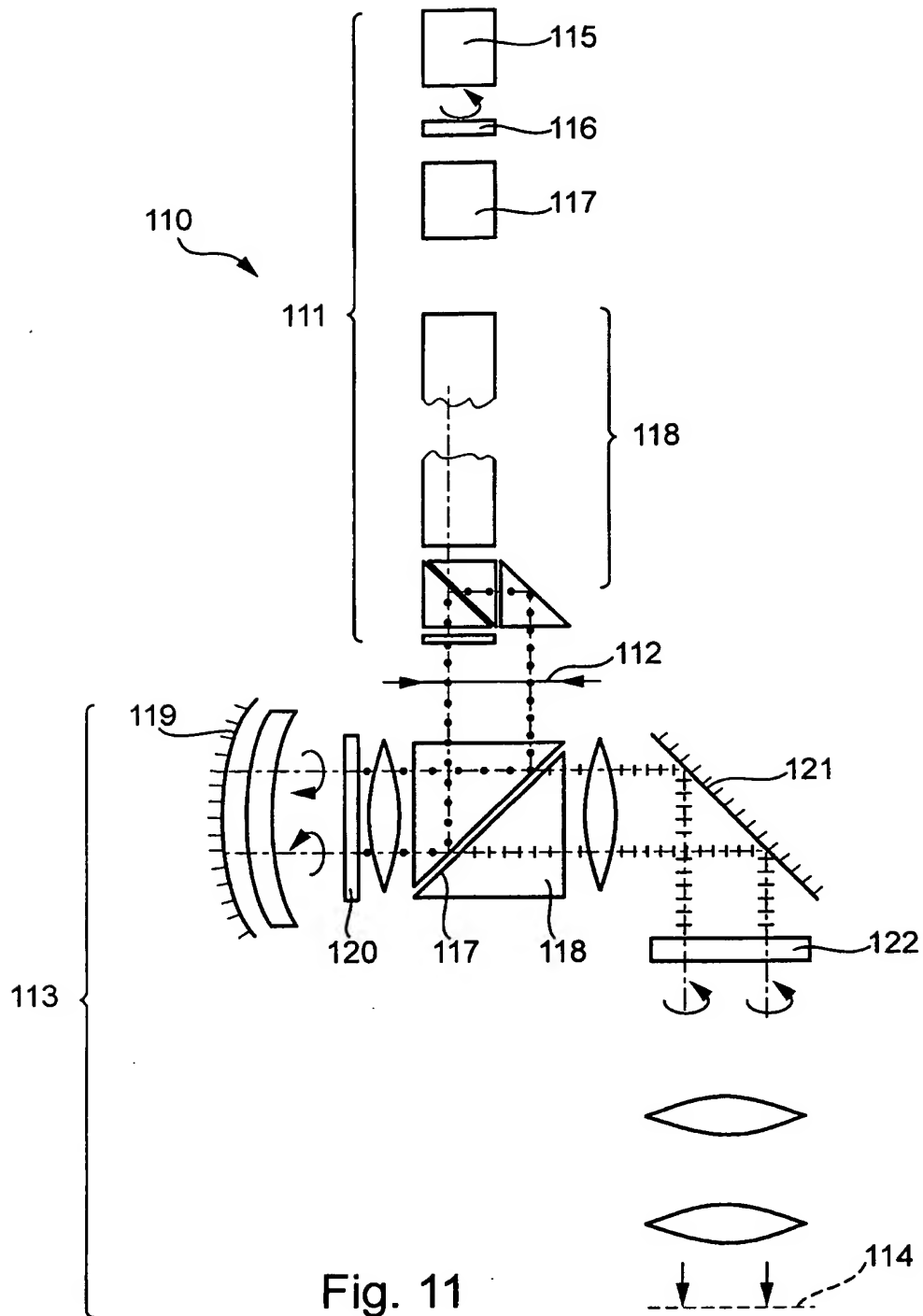


Fig. 11

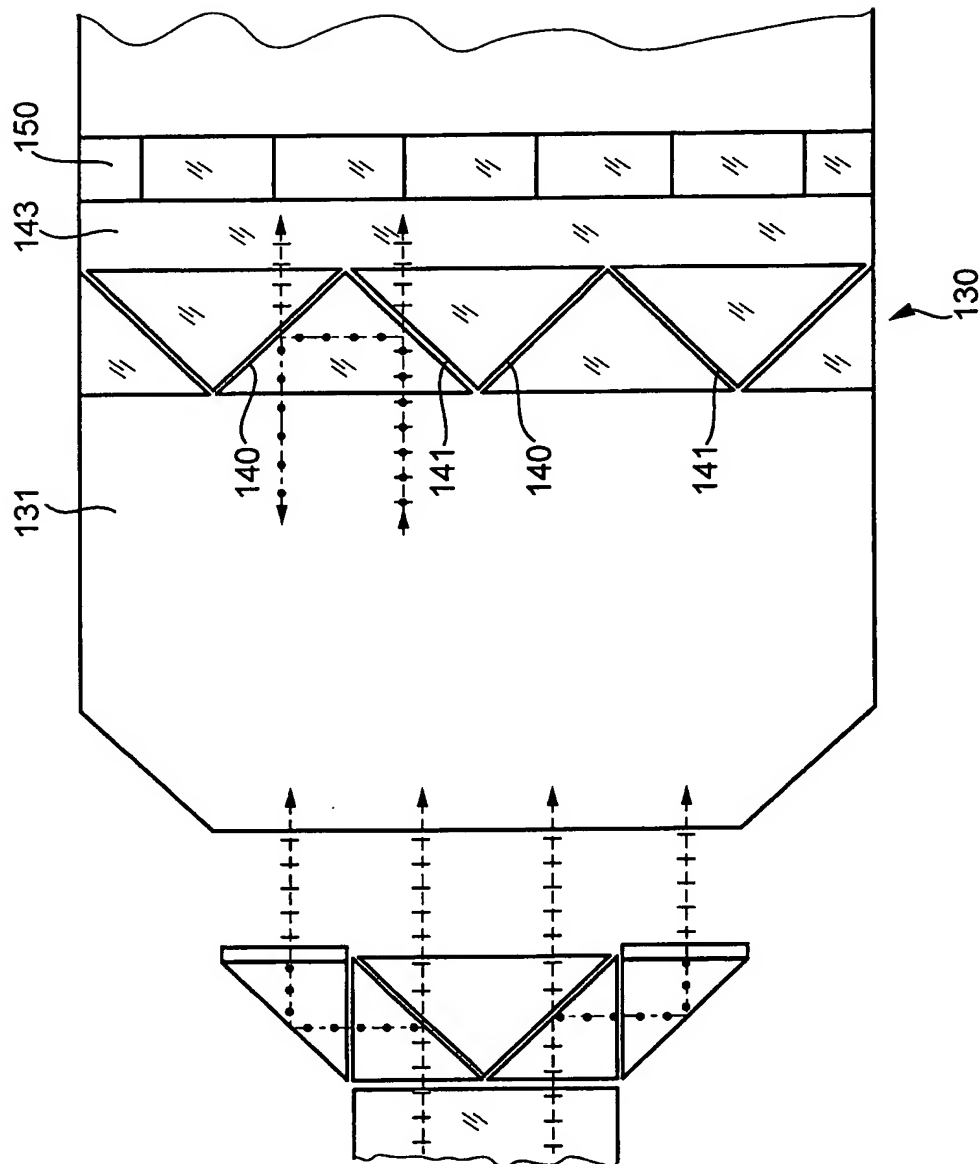


Fig. 12